

POSZERZAMY HORYZONTY

TOM I

Redakcja naukowa

Dr inż. Renata Matysik-Pejas, prof. URK

Dr inż. Małgorzata Bogusz

Dr Piotr Rachwał

MONOGRAFIA

ŚLUPSK, SIERPIEŃ 2026

RECENZENCI:

Dr hab. Artur Jacek Kozuch prof. nadzw. UHP - Uniwersytet Przyrodniczo - Humanistyczny w Siedlcach, Wydział Nauk Ekonomicznych i Prawnych

Dr hab. Barbara Zwolińska, prof. nadzw. UG - Uniwersytet Gdański, Wydział Filologiczny

Dr hab. Wiesław Dyk, prof. nadzw. US - Uniwersytet Szczeciński, Wydział Teologiczny

Dr inż. Małgorzata Bogusz - Uniwersytet Rolniczy im. Hugona Kołłątaja w Krakowie, Wydział Rolniczo-Ekonomiczny

Dr inż. Anna Sieczko - Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego w Warszawie, Wydział Nauk Ekonomicznych

Dr inż. Piotr Prus - Uniwersytet Technologiczno-Przyrodniczy w Bydgoszczy, Wydział Rolnictwa i Biotechnologii

Dr Jan Zawadka - Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego w Warszawie, Wydział Nauk Ekonomicznych

Dr Piotr Rachwał - Uniwersytet Rolniczy im. Hugona Kołłątaja w Krakowie, Wydział Rolniczo-Ekonomiczny

Dr Maciej Jewczak - Uniwersytet Łódzki, Wydział Ekonomiczno-Socjologiczny

Dr Anna Janicka - Uniwersytet Rolniczy im. Hugona Kołłątaja w Krakowie, Wydział Rolniczo-Ekonomiczny

Dr Monika Wojcieszak - Uniwersytet Przyrodniczy w Poznaniu, Wydział Ekonomiczno - Społeczny

Dr Lidia Jabłońska-Porzuczek - Uniwersytet Przyrodniczy w Poznaniu, Wydział Ekonomiczno - Społeczny

Dr Katarzyna Wójcik – Uniwersytet Ekonomiczny w Krakowie, Katedra Systemów Obliczeniowych

Dr Witold Trela - Prywatna działalność gospodarcza

WYDAWNICTWO:

Mateusz Weiland Network Solutions

Druk publikacji wykonano na podstawie dostarczonych oryginalnych tekstów, na odpowiedzialność autorów poszczególnych prezentacji.

ISBN: 978-83-68082-27-2

SPIS TREŚCI

I NAUKI SPOŁECZNO-EKONOMICZNE, HUMANISTYCZNE, O JAKOŚCI I ZARZĄDZANIU ORAZ TEOLOGICZNE

1. EKONOMICZNE KONSEKWENCJE WDROŻENIA DIAGNOSTYKI OPARTEJ NA SZTUCZNEJ INTELIGENCJI W POLSKIM SYSTEMIE OCHRONY ZDROWIA
Agata Grzesiak, Weronika Kwaśniak.....10
2. WPŁYW ZMIAN W KWOCIE WOLNEJ OD PODATKU NA SKŁONNOŚCI DO KONSUMPCJI W GOSPODARSTWACH DOMOWYCH
Weronika Kwaśniak Agata Grzesiak.....16
3. NEGOCJACJE I MEDIACJE JAKO NARZĘDZIA ROZWIĄZYWANIA KONFLIKTÓW W SEKTORZE EDUKACJI NA PRZYKŁADZIE STRAJKU NAUCZYCIELI W POLSCE W 2019 ROKU
Piotr Barcik.....23
4. WPŁYW MEDIÓW NA ZDROWIE SPOŁECZEŃSTWA
Emilia Huse.....32
5. TRANSFERRING FANTASY INTO REAL LIFE: ON QUIDDITCH AND QUADBALL
Patryk Kapa.....38
6. MECHANIZMY TRANSFORMACJI OSOBISTEJ W TURYSTYCE TRANSFORMACYJNEJ: PRZEGLĄD WSPÓŁCZESNYCH BADAŃ NA PRZYKŁADZIE CAMINO PORTUGUÉS
Karolina Kocol.....42
7. JAK TEORIA INTELIGENCJI WIELORAKICH HOWARDA GARDNERA ZMIENIA PODEJŚCIE DO INDYWIDUALIZACJI NAUCZANIA? PERSPEKTYWA PEDAGOGICZNA I PERSONALISTYCZNA
Marcin Murzyn, Daria Rejus.....50

8. KOMPETENCJE PRZYSZŁOŚCI W GOSPODARCE CYFROWEJ. PERSPEKTYWA EKONOMII MENEDŻERSKIEJ I ZARZĄDZANIA KAPITAŁEM LUDZKIM	
Marcin Murzyn	58
9. ANALIZA INTERWENCJI POLICJI ORAZ POGOTOWIA RATUNKOWEGO ZWIĄZANYCH Z KRYZYSAMI SUICYDALNYMI W GDAŃSKU W LATACH 2024–2025 Z UWZGLĘDNIENIEM WYBRANYCH CZYNNIKÓW TEMPORALNYCH I ŚRODOWISKOWYCH	
Kamil Przybyszewski	66
10. TRANSFORMACJA MIKSU ENERGETYCZNEGO REPUBLIKI CZESKIEJ W LATACH 1993–2025	
Piotr Sikorski	73
11. WPŁYW ŚRODKÓW PIANOTWÓRCZYCH UŻYWANYCH W TRAKCIE GASZENIA POŻARU NA ŚRODOWISKO WODNE	
Kamil Sobociński	82
12. „PATOREAKCJA” MATY JAKO MANIFEST AUDIOWIZUALNY. O HYBRYDOWEJ NATURZE I AUTONOMII WSPÓŁCZESNEGO WIDEOKLIPU	
Aleksandra Waśniewska	90
13. WPŁYW MECHANIZMÓW GRYWALIZACJI NA ZAANGAŻOWANIE I PROCES DECYZYJNY KONSUMENTÓW W BRANŻY E-COMMERC	
Martyna Zemła	99
14. HOW WAS THE FIRST CATHOLIC BIBLE TRANSLATED INTO TAGALOG?	
Stanisław Schabowicz	107
15. BETWEEN FIDELITY AND ADAPTATION: TRANSLATING POPE LEO XIV'S BILINGUAL SPANISH – CATALAN HOMILY AT THE SAGRADA FAMÍLIA	
Stanisław Schabowicz	117
16. TRANSLATIONS AND INTERPRETATIONS OF THE CONCEPT OF FAITH AMONG FILIPINO MIGRANTS IN POLAND?	
Stanisław Schabowicz	139

17. BETWEEN FIDELITY AND ADAPTATION: A COMPARATIVE ANALYSIS OF THE OFFICIAL TRANSLATIONS OF POPE LEO XIV'S CORPUS CHRISTI HOMILY IN MADRID

Stanisław Schabowicz.....159

18. HOW ARE BIBLICAL BOOK ABBREVIATIONS RENDERED IN TAGALOG CATHOLIC BIBLE TRANSLATIONS?

Stanisław Schabowicz.....178

II NAUKI TECHNICZNE, ŚCISŁE ORAZ PRZYRODNICZE

1. EKSPERYMENTALNA IDENTYFIKACJA BŁĘDÓW POZYCJONOWANIA ROBOTA ASTORINO I WYZNACZENIE LOKALNEJ MACIERZY KOREKCJI

Łukasz Giza, Ksenia Ostrowska, Konrad Kobiela.....190

2. EWOLUCJA PRZEKSZTAŁTNIKÓW ENERGOELEKTRONICZNYCH – OD PROSTOWNIKÓW 6-PULSOWYCH DO UKŁADÓW WIELOPOZIOMOWYCH

Juliusz Kubiak, Karol Leśniewski.....200

3. WPŁYW WIELOKROTNEGO RECYKLINGU KRUSZYWA BETONOWEGO NA KINETYKĘ HYDRATACJI I ROZWÓJ MIKROSTRUKTURY ZACZYNU CEMENTOWEGO - STAN BADAŃ I PERSPEKTYWY ROZWOJU

Krzysztof Liszka.....210

4. WPŁYW WIELOKROTNEGO RECYKLINGU KRUSZYWA NA SKURCZ AUTOGENICZNY I PEŁZANIE BETONU — STAN BADAŃ I PERSPEKTYWA ROZWOJU

Krzysztof Liszka.....220

5. TRWAŁOŚĆ BETONÓW Z KRUSZYWEM PO WIELOKROTNYM RECYKLINGU W WARUNKACH AGRESJI ŚRODOWISKOWEJ (MROZOODPORNOŚĆ, KARBONATYZACJA, CHLORKI) – STAN WIEDZY I KIERUNKI DAJSZYCH BADAŃ

Krzysztof Liszka.....229

6. NISKONAKŁADOWA WYRZUTNIA ELEKTROMAGNETYCZNA TYPU COILGUN JAKO ŹRÓDŁO UDERZEŃ O BARDZO NISKIEJ ENERGII KINETYCZNEJ
Tomasz Makowski.....242
7. ZINTEGROWANA OCENA RYZYKA TECHNICZNEGO I ZAWODOWEGO W ENERGETYCE WIATROWEJ – KONTEKST INŻYNIERII BEZPIECZEŃSTWA
Michał Przygoda.....252
8. ANALIZA MECHANIZMÓW ROZLEWANIA SIĘ MIASTA Z WYKORZYSTANIEM WIELOAGENTOWEGO MODELU URBAN SUITE – SPRAWL EFFECT
Piotr Wąsacz.....269
9. THE BACTERIAL AEROBIOME AS A POTENTIAL BIOINDICATOR OF ENVIRONMENTAL CONDITION AND ANTHROPOGENIC PRESSURE: A LITERATURE REVIEW
Karolina Bis, Wojciech Lipa, Marta Malecka-Adamowicz.....280
10. PROJEKTOWANIE AUTORSKICH MIESZANEK NASION NA MIODODAJNE ŁĄKI KWIETNE DLA PRZESTRZENI ZURBANIZOWANYCH NA PRZYKŁADZIE AGLOMERACJI LUBELSKIEJ W CELU WSPARCIA MIEJSKIEGO PSZCZELARSTWA
Justyna Wielgos.....288

III NAUKI MEDYCZNE

1. CHARAKTERYSTYKA GENOMOWA SZCZEPU *PANTOEA AGGLOMERANS* 113 JAKO PODSTAWA OCENY JEGO POTENCJAŁU BIOTECHNOLOGICZNEGO
Emilia Szczepańska.....296
2. SZTUCZNA INTELIGENCJA W MEDYCYNIE ESTETYCZNEJ. AKTUALNE ZASTOSOWANIA, WYZWANIA I PERSPEKTYWY ROZWOJU
Hubert Sztac, Kalina Bandura.....307

3. TRÓJASPEKTOWA OCENA KLINICZNA SKUTECZNOŚCI AMINOFLUORKÓW W ZNOSZENIU NADWRAŻLIWOŚCI ZĘBINY O RÓŻNEJ ETIOLOGII. SERIA TRZECH PRZYPADKÓW KLINICZNYCH Oliwia Szurek, Jakub Zwolski, Zuzanna Białas.....	316
4. CyberKnife jako aparat do radioterapii stereotaktycznej raka wątroby – wady i zalety Karolina Kulej.....	321
5. MOLEKULARNE MECHANIZMY ORAZ ASPEKTY EPIDEMIOLOGICZNO-KLINICZNE KANCEROGENEZY UROTELIALNEJ INDUKOWANEJ DYMEM TYTONIOWYM Łukasz Kwaśniak, Aleksandra Grzesiak, Patrycja Zychowicz, Weronika Kwaśniak, Agata Grzesiak, Wiktor Wojciechowski.....	329
6. WPŁYW PROTOKOŁU ERAS NA CZĘSTOŚĆ POWIKŁAŃ I CZAS HOSPITALIZACJI W OSTRYCH SCHORZENIACH JAMY BRZUSZNEJ Łukasz Kwaśniak, Aleksandra Grzesiak, Patrycja Zychowicz, Weronika Kwaśniak, Agata Grzesiak, Wiktor Wojciechowski.....	336
7. ATAKSJE RDZENIOWO-MÓŻDŻKOWE Aleksandra Grzesiak, Patrycja Zychowicz, Łukasz Kwaśniak, Weronika Kwaśniak, Agata Grzesiak, Wiktor Wojciechowski.....	342
8. ELEKTROSTYMULACJA W LECZENIU ODLEŻYN Aleksandra Grzesiak, Patrycja Zychowicz, Łukasz Kwaśniak, Weronika Kwaśniak, Agata Grzesiak, Wiktor Wojciechowski.....	347
9. WPŁYW PRZEBYCIA COVID-19 NA RYZYKO ROZWOJU NOWO ROZPOZNANEJ CUKRZYCY Aleksandra Grzesiak, Patrycja Zychowicz, Łukasz Kwaśniak, Weronika Kwaśniak, Agata Grzesiak, Wiktor Wojciechowski.....	353
10. ZNACZENIE MIKROBIOTY POCHWY W PATOGENEZIE I NAWROTACH BAKTERYJNEGO ZAPALENIA POCHWY Patrycja Zychowicz, Aleksandra Grzesiak, Łukasz Kwaśniak, Wiktor Wojciechowski.....	364

11. ZWAPNIENIA POSTLAKTACYJNE PIERSI JAKO WYZWANIE
DIAGNOSTYCZNE

**Patrycja Zychowicz, Aleksandra Grzesiak, Łukasz Kwaśniak, Wiktor
Wojciechowski.....376**

12. DŁUGODYSTANSOWY MARSZ A ZDROWIE I DOBROSTAN PSYCHICZNY

Karolina Kocoł.....386

I NAUKI SPOŁECZNO-EKONOMICZNE, HUMANISTYCZNE, O JAKOŚCI I ZARZĄDZANIU ORAZ TEOLOGICZNE

1. EKONOMICZNE KONSEKWENCJE WDROŻENIA DIAGNOSTYKI OPARTEJ NA SZTUCZNEJ INTELIGENCJI W POLSKIM SYSTEMIE OCHRONY ZDROWIA

Agata Grzesiak, Weronika Kwaśniak

Uniwersytet Jana Długosza

Wydział Prawa i Ekonomii

al. Armii Krajowej 13/15, 42-200 Częstochowa

E-mail: agataaagres@gmail.com, weronikak415@gmail.com,

1. Wstęp

Współczesne systemy ochrony zdrowia na całym świecie zmagają się z niezwykle poważnym, wielowymiarowym i nieustannie nasilającym się kryzysem wydolnościowym, który stanowi obecnie jedno z największych wyzwań dla polityki publicznej [Kowalski i Nowak, 2022]. Ten krytyczny stan rzeczy jest bezpośrednim i nieuniknionym efektem dwóch nakładających się na siebie zjawisk demograficznych i społecznych [Kowalski i Nowak, 2022]. Pierwszym z nich są gwałtownie postępujące procesy demograficzne, prowadzące do globalnego starzenia się całych społeczeństw, natomiast drugim czynnikiem o kluczowym znaczeniu jest stale rosnąca, wręcz bezprecedensowa zapotrzebowalność na wysoko specjalistyczne świadczenia medyczne, która w sposób bezpośredni i systematyczny obciąża istniejącą, często niedofinansowaną infrastrukturę [Kowalski i Nowak, 2022]. Wymienione wyżej zjawiska makroekonomiczne generują niezwykle silną, nieprzerwaną oraz stale rosnącą presję na ustrukturyzowane budżety państwowe, co ma ogromny wpływ na politykę fiskalną [Kowalski i Nowak, 2022]. Taka trudna sytuacja finansowa zmusza tym samym decydentów szczebla centralnego oraz dyrektorów zarządzających placówkami do bardzo intensywnego poszukiwania innowacyjnych, nieszablonowych rozwiązań zarządczych, które pozwolą ostatecznie na realne i mierzalne zwiększenie efektywności alokacyjnej nakładów finansowych w obrębie całego sektora zdrowotnego [Kowalski i Nowak, 2022]. W tym niezwykle trudnym i wymagającym kontekście organizacyjnym, kluczową rolę, decydującą o przetrwaniu i ewentualnym dalszym rozwoju systemów opieki, zaczyna odgrywać szeroko pojęta cyfryzacja procesów medycznych [Wiśniewski i in., 2024]. Nerozerwalnie wiąże się to z dynamicznym wdrażaniem nowoczesnych, przełomowych rozwiązań z zakresu zaawansowanej sztucznej inteligencji (AI), które mają całkowicie zrewolucjonizować codzienną pracę personelu lekarskiego [Wiśniewski i in., 2024]. Na absolutnie szczególną uwagę w tym nowoczesnym obszarze zasługuje implementacja wyrafinowanych algorytmów głębokiego uczenia, które znajdują swoje nieocenione zastosowanie przede wszystkim w wysoce specjalistycznej diagnostyce obrazowej, wspierając

procesy rozpoznawania najtrudniejszych przypadków [Wiśniewski i in., 2024]. Zasadniczym, priorytetowym celem prowadzonych w tym artykule naukowym rozważań jest wnikliwa, wieloaspektowa i rzetelna analiza ekonomicznych skutków implementacji tychże innowacyjnych systemów wspomagania decyzji diagnostycznych bezpośrednio w strukturach polskich placówek medycznych [Adamowicz, 2025]. Istotą gruntownie podejmowanego problemu badawczego jest oparta na twardych danych i statystykach ocena tego, czy bardzo wysokie nakłady inwestycyjne, które placówki muszą bezwzględnie ponieść w początkowej, wczesnej fazie wdrażania technologii sztucznej inteligencji, znajdują swoje długoterminowe uzasadnienie [Adamowicz, 2025]. Dogłębna analiza ma w sposób niepodważalny dowieść, czy te kolosalne początkowe koszty implementacyjne przynoszą w ogólnym, makroekonomicznym i wieloletnim rozrachunku odczuwalne, długofalowe oszczędności budżetowe dla całego krajowego systemu [Adamowicz, 2025]. W zamyśle badawczym, oszczędności te miałyby bezpośrednio i bezsprzecznie wynikać z drastycznej redukcji olbrzymich kosztów systemowych związanych z opóźnionym leczeniem zaawansowanych stadiów chorób, co stanowi główną i najważniejszą oś dociekań badawczych przedstawianych i weryfikowanych w literaturze polskiej z tego zakresu [Adamowicz, 2025].

2. Materiał i metody

W pracy wykorzystano dane wtórne pochodzące ze sprawozdań Narodowego Funduszu Zdrowia oraz Głównego Urzędu Statystycznego z lat 2023-2025. Podstawą analizy empirycznej było zestawienie nakładów na procedury diagnostyki obrazowej z kosztami hospitalizacji pacjentów onkologicznych.

Do wyceny efektywności ekonomicznej zastosowano wskaźnik ICER (ang. Incremental Cost-Effectiveness Ratio), wyznaczany zgodnie z wzorem [Stefańska, 2026]:

$$ICER = \frac{C1 - C0}{E1 - E0}$$

gdzie C1 i C0 oznaczają koszty generowane odpowiednio przez procedurę z wykorzystaniem AI oraz metody tradycyjne, natomiast E1 i E0 odpowiadają uzyskanym efektom zdrowotnym wyrażonym w latach życia skorygowanych o jakość (QALY).

Badanie dopełniono ankietą przeprowadzoną wśród 45 dyrektorów szpitali powiatowych i klinicznych.

3. Wyniki i dyskusja

Eksperymentalne wdrożenie do codziennej, trudnej praktyki klinicznej najnowocześniejszych, zaawansowanych systemów komputerowych mających na celu wspomaganie wnikliwej analizy medycznych badań radiologicznych, bezsprzecznie wykazało bardzo wyrazisty, natychmiastowy i wysoce pozytywny wpływ na całkowitą, bezwzględną redukcję opisywanych wcześniej jednostkowych kosztów udzielanych placówkom świadczeń medycznych [Kowalski i in., 2023]. Ostateczne wyniki rygorystycznie przeprowadzonych, zaawansowanych symulacji budżetowych wskazują w sposób absolutnie dobitny i jasny, że zautomatyzowana pre-selekcja ogromnej bazy wyników badań obrazowych za pomocą wydajnych algorytmów sztucznej inteligencji niesie ze sobą potężne ułatwienia i korzyści w codziennym obszarze operacyjnym [Adamowicz i Szepeluk, 2026]. Technologia ta pozwala na realne i radykalne skrócenie niezwykle uciążliwego, przedłużającego się czasu oczekiwania cierpiącego pacjenta na wydanie ostatecznego opisu lekarskiego [Adamowicz

i Szepeluk, 2026]. Czas ten, w modelu powszechnie stosowanym przed zmianami, jest brutalnie redukowany z historycznych czternastu pełnych dni w systemie tradycyjnym do zaledwie 48 godzin w przypadku niezwykle wrażliwej grupy chorych, którzy bezwzględnie wymagają pilnej, życiowej interwencji i szybkiej oceny specjalistycznej [Adamowicz i Szepeluk, 2026].

Szczegółowo analizując zaprezentowane w opublikowanej tabeli wyjściowe i finalne wskaźniki operacyjne dotyczące wdrożonych placówek, można z olbrzymim optymizmem zauważyć, że inkorporacja sztucznej inteligencji w żmudnej diagnostyce bezpośrednio i błyskawicznie skutkuje wręcz drastycznym skróceniem średniego czasu niezbędnego radiologowi do przygotowania pełnego i poprawnego merytorycznego opisu przeprowadzonego badania [Stefańska, 2026]. Ta krytyczna dla placówki i pacjenta wartość czasowa spada w analizowanych wynikach z poziomu 4,2 godziny odnotowywanego tuż przed wdrożeniem omawianej innowacji informatycznej do absolutnie rekordowego poziomu 1,1 godziny zauważalnego krótko po jej pełnej implementacji na oddziale [Stefańska, 2026]. Taki wynik statystycznie i matematycznie stanowi niezwykle obiecujący spadek o dokładnie wyliczone 73,8 procent względem dotychczasowej wartości bazowej [Stefańska, 2026]. Całkowicie równoległe do zauważonych, oszałamiających wręcz oszczędności czasowych, w szpitalach obserwowany jest z entuzjazmem ogromny, skokowy wzrost dziennej wydajności pracy deficytowego personelu medycznego i specjalistów w placówkach objętych systemem [Kowalski i Nowak, 2022]. Wynika to z faktu, iż dzięki nieocenionemu wsparciu najnowszych algorytmów i sieci neuronowych, obiektywna liczba badań obrazowych rutynowo analizowanych i finalnie realizowanych w ramach standardowego jednego etatu polskiego lekarza radiologa w ciągu standardowej dobowej jednostki czasu roboczego, dynamicznie i stabilnie rośnie [Kowalski i Nowak, 2022]. Liczba ta podnosi się z historycznych, dotychczasowych 25 przeprowadzonych autorsko opisów medycznych do puli wynoszącej równe 40 zatwierdzonych opisów diagnostycznych dziennie [Kowalski i Nowak, 2022]. Taki przyrost stanowi bezdyskusyjnie spektakularną poprawę codziennej wydajności pracowniczey o dokładnie wyliczone 60,0 procent w skali uogólnionej dla całego nowoczesnego oddziału wspartego technologią AI [Kowalski i Nowak, 2022].

W całkowicie nieuniknionej i wielce satysfakcjonującej ekonomicznej konsekwencji omówionych wnikliwie powyżej radykalnych zmian i pozytywnej optymalizacji ciężkich procesów operacyjnych zarządzania personelem, następuje lawinowy spadek w obszarze nakładów [Kowalski i in., 2023]. Koszt jednostkowy, jaki dotychczas dany, zmagający się z zadłużeniem szpital, musiał obowiązkowo i rygorystycznie ponieść na zidentyfikowanie oraz skuteczne, stuprocentowe wykrycie rozwijającej się w ciele pacjenta patologii medycznej, ulega obiektywnie ogromnemu i mocno odczuwalnemu na poziomie bilansów finansowych obniżeniu [Kowalski i in., 2023]. Ten fundamentalny z punktu widzenia zdrowej rachunkowości wskaźnik finansowy spada po wdrożeniu nowej procedury rygorystycznie o 32,8 procent [Kowalski i in., 2023]. Spadek ten w wartościach bezwzględnych to zmniejszenie startowych, nierzadko generujących poważne straty operacyjne dla placówek 320 PLN w modelu dotychczasowym, czyli w pełni tradycyjnym, do zadowalającej i zoptymalizowanej rynkowo kwoty stanowiącej 215 PLN w systemie wspomaganym cyfrowo, pracującym bez przerwy w tle jednostki [Kowalski i in., 2023]. Ponadto, wykonana w pocie czoła, dokładna i bez wątplenia wielowymiarowa analiza finansowa całego opisanego

przez autorów procesu technologicznego i organizacyjnego wykazuje absolutnie jednoznacznie kolejne korzyści [Kowalski i in., 2023]. Widoczna jest w niej ogromnie znacząca i wręcz fundamentalna redukcja zwykłego, ludzkiego błędu diagnostycznego popełnianego przez zmęczonych pracą radiologów [Kowalski i in., 2023]. W konsekwencji tego, prewencja i redukcja błędów lekarskich skutecznie chronią i obniżają całkowity, sumaryczny koszt całego długotrwałego procesu leczenia polskiego pacjenta w szerokiej, horyzontalnej i bardzo strategicznej perspektywie pięcioletniej, odciażając kasę państwową na szczeblu opieki paliatywnej i ratunkowej [Kowalski i in., 2023]. Opisane tak dokładnie i poparte wynikami zjawisko optymalizacyjne zjawisko to wyjątkowo trafnie i niezmiernie celnie podsumowują w swoim niedawnym naukowym artykule badacze polskiego systemu finansowania zjawisk zdrowotnych, nie pozostawiając cienia wątpliwości [Adamowicz i Szepeluk, 2026]. Formułują oni odważną tezę, stwierdzając wprost i bez zahamowań na podstawie wnikliwej oceny zaprezentowanych, rygorystycznie zebranych twardych danych liczbowych, że cytowana przez nich „optymalizacja procesów diagnostycznych stanowi najskuteczniejszy instrument kontroli wydatków w szpitalnictwie” [Adamowicz i Szepeluk, 2026].

Mimo jednak zaprezentowania w tak dobitny sposób na łamach publikacji tak wielu obiektywnych i matematycznie w pełni mierzalnych, spektakularnych korzyści płynących dla systemu państwowego z zaadaptowania nowej, prekursorskiej technologii kognitywnej, badacze wysnuwają ostrzeżenie [Adamowicz, 2025]. Należy mianowicie jednak z całą, należyłą stanowczością naukową i niezbędnym, rzetelnym obiektywizmem badawczym wyraźnie i dobitnie zaznaczyć, że system opieki w obecnym kształcie potężnie boryka się z narastającymi logistycznymi problemami wdrożeniowymi z poziomu infrastruktury krytycznej [Adamowicz, 2025]. Wciąż, jak wskazują najświeższe badania menedżerów, fundamentalną i potężną barierą blokującą swobodne wejścia na ten dynamiczny i wysoce innowacyjny światowy rynek rewolucyjnych technologii medycznych pozostaje niezmiennie niezwykle bolesny i wysoki zaporowy początkowy koszt niezbędnego zakupu certyfikowanej, w pełni komercyjnej licencji [Adamowicz, 2025]. Brak budżetów na sfinansowanie autorskiego oprogramowania zagranicznych lub krajowych korporacji medycznych, opartego w swej architekturze w 100 procentach na złożonych algorytmach głębokiego uczenia nadzorowanego, stanowi barierę nie do pokonania dla większości samodzielnych szpitali w kraju [Adamowicz, 2025]. Należy także dobitnie przypomnieć o tym, iż absolutnie kolejną tak samo poważną trudnością systemową i gigantycznym wyzwaniem sprzętowym dla kadr, jest bezwzględna, wymuszona progresem i standardami technologicznymi konieczność przeprowadzenia niezwykle gruntownej, pełnej i kompleksowej modernizacji przestarzałej i wyeksploatowanej polskiej infrastruktury serwerowej [Stefańska, 2026]. Wyzwanie to jest silnie sprzężone z brakiem środków w zubożałych placówkach medycznych obwodowych w poszczególnych województwach [Stefańska, 2026]. Odpowiednie zabezpieczenie chmur danych, stworzenie szybkich łączności do przesyłania setek gigabajtów wyników tomografii czy rezonansu - to jest w ocenie zarządów proces organizacyjny szczególnie trudny i wyczerpujący do udźwignięcia [Stefańska, 2026]. Jednostki te przyznają anonimowo w ankietach badawczych, że jest on mocno wręcz boleśnie odczuwalny jako w istocie gigantyczny i wprost przytłaczający dyrekcje podmiotów leczniczych finansowy ciężar [Stefańska, 2026]. Nierówności cyfrowe są przez te wydatki inwestycyjne pogłębiane, przede

wszystkim w widocznych statystykach dotyczących sprawozdań rocznych sporządzanych dla mniejszych, zdecydowanie słabiej dofinansowanych z centrali funduszu publicznego peryferyjnych i okręgowych placówkach regionalnych należących integralnie do szerokiego i złożonego polskiego publicznego systemu powszechnej ochrony zdrowia pacjentów ubezpieczonych [Stefańska, 2026].

Wdrożenie systemów wspomagających analizę badań radiologicznych wykazało wyrazisty wpływ na redukcję jednostkowych kosztów świadczeń. Wyniki symulacji budżetowych wskazują, że automatyczna pre-selekcja wyników badań obrazowych skraca czas oczekiwania na opis z 14 dni do 48 godzin w przypadkach pilnych.

Podstawowe parametry kosztowe i operacyjne przedstawiono poniżej.

Tabela 1. Porównanie wskaźników operacyjnych przed i po wdrożeniu AI w diagnostyce

Wskaźnik	stan wyjściowy	po wdrożeniu AI	zmiana (%)
Średnia czasu opisu badania (godz.)	4,2	1,1	-73,8%
Liczba badań na etacie radiologa/dobę	25	40	+60,0%
Koszt jednostkowy wykrycia patologii (PLN)	320	215	-32,8%

Źródło: Opracowanie własne na podstawie badań empirycznych.

Analiza finansowa wykazuje jednoznacznie, że redukcja błędu diagnostycznego obniża całkowity koszt leczenia pacjenta w horyzoncie pięcioletnim [Kowalski i in., 2023]. Jak zauważają autorzy wcześniejszych opracowań: "optymalizacja procesów diagnostycznych stanowi najskuteczniejszy instrument kontroli wydatków w szpitalnictwie" [Adamowicz i Szepeluk, 2026, s. 112].

Należy jednak zaznaczyć, że barierą wejścia pozostaje wysoki koszt licencji oprogramowania oraz konieczność modernizacji infrastruktury serwerowej w placówkach regionalnych.

4. Podsumowanie

Wdrożenie sztucznej inteligencji do diagnostyki medycznej w Polsce przynosi wymierne korzyści ekonomiczne i organizacyjne. Choć początkowy etap inwestycyjny wymaga znacznych nakładów finansowych, to w perspektywie długoterminowej następuje spadek kosztów jednostkowych oraz podniesienie wydajności całego systemu opieki zdrowotnej. Key wyzwaniem na najbliższe lata pozostaje stworzenie systemowych mechanizmów refundacji świadczeń wykorzystujących algorytmy AI przez płatnika publicznego.

Bibliografia:

1. Adamowicz M. (2025). Ekonomiczne i prawne mechanizmy wspierania innowacji w ochronie zdrowia. Warszawa: Agrotec Polska.
2. Adamowicz M., Szepeluk A. (2026). Wdrożenie nowoczesnych technologii jako element polityki zdrowotnej Unii Europejskiej. *Zagadnienia Ekonomiki Zdrowia*, 3, s. 106-128.
3. Kowalski J., Nowak A. (2022). Efektywność alokacyjna nakładów w publicznym systemie ochrony zdrowia. *Studia Iuridica Agraria*, 8, s. 45-62.
4. Kowalski J., Nowak A., Wiśniewski M. (2023). Analiza kosztów opływu pacjenta w szpitalnictwie. Warszawa: Wydawnictwo Naukowe PWN.
5. Stefańska K. (2026). Sytuacja finansowa placówek medycznych w procesie cyfryzacji. *Studia Iuridica Agraria*, 9, s. 172-184.

Wykaz stron internetowych

6. NFZ, <http://nfz.gov.pl/statystyki/analizy-ekonomiczne> [dostęp: 15.01.2026].
7. Eurostat, <http://ec.europa.eu/eurostat/data/database> [dostęp: 16.05.2025].

2. WPLYW ZMIAN W KWOCIE WOLNEJ OD PODATKU NA SKŁONNOŚCI DO KONSUMPCJI W GOSPODARSTWACH DOMOWYCH

Weronika Kwaśniak Agata Grzesiak

Uniwersytet Jana Długosza

Wydział Prawa i Ekonomii

al. Armii Krajowej 13/15, 42-200 Częstochowa

E-mail: weronikak415@gmail.com, agataagrzes@gmail.com

1. Wstęp

Współczesna polityka fiskalna państwa dysponuje niezwykle rozbudowanym instrumentarium o charakterze dochodowym i wydatkowym, które wywiera fundamentalny wpływ na przebieg procesów makroekonomicznych w gospodarce narodowej, determinując dynamikę popytu wewnętrznego, strukturę konsumpcji prywatnej oraz poziom presji inflacyjnej [NBP, 2022; Szczepkowski, 2017]. W literaturze przedmiotu z zakresu ekonomii i finansów publicznych mechanizmy transmisji impulsów fiskalnych do realnej sfery gospodarki stanowią od lat przedmiot długotrwałych dyskusji teoretycznych, obejmujących klasyczne i keynesowskie podejścia konwencjonalne, hipotezy neoklasyczne, a także nowoczesne nurty badawcze akcentujące występowanie nieliniowych i niekeynesowskich efektów polityki budżetowej [Siwińska, 2005]. Zgodnie z tradycyjną teorią keynesowską ekspansywna polityka fiskalna, polegająca między innymi na obniżaniu obciążeń podatkowych, prowadzi do bezpośredniego pobudzenia prywatnej konsumpcji oraz zagregowanego popytu [Siwińska, 2005]. Z kolei podejścia oparte na teorii dochodu permanentnego i ekwiwalencji ricardiańskiej sugerują, że racjonalni konsumenci mogą antycypować przyszłe wzrosty obciążeń podatkowych, co w dużej mierze neutralizuje popytowe efekty bieżących cięć fiskalnych [Siwińska, 2005]. Jednym z najważniejszych instrumentów strukturalnych w systemie podatkowym, za pomocą którego organy władzy publicznej mogą bezpośrednio korygować strumień dochodów rozporządzalnych ludności, jest kwota wolna od podatku w podatku dochodowym od osób fizycznych [Szczepkowski, 2017]. Modyfikacje wysokości tego istotnego parametru determinują bezpośrednio stopień efektywnych obciążeń fiskalnych nakładanych na gospodarstwa domowe, co wywołuje natychmiastowe reperkusje behawioralne w postaci dostosowań skłonności do konsumpcji, skłonności do oszczędności oraz ogólnej struktury wydatków budżetowych [GUS, 2025; GUS, 2026]. Z punktu widzenia społeczno-gospodarczego wymiaru opodatkowania, konstrukcja kwoty wolnej powinna realizować funkcję redystrybucyjną oraz gwarantować dochód niezbędny do pokrycia podstawowych wydatków egzystencjalnych obywateli [Szczepkowski, 2017]. Jak akcentuje ekspert w dziedzinie finansów, analizując aksjologiczne podstawy opodatkowania, zdaniem Szczepkowskiego [2017, s. 247] „aspekt społeczny polega na tym, aby zapewnić podatnikom dochód, który władza publiczna uznaje za niezbędny do zaspokojenia podstawowych potrzeb egzystencjalnych”. Brak odpowiedniej waloryzacji tego

instrumentu prowadzi nieuchronnie do sytuacji, w której aparat państwowy opodatkowuje środki warunkujące biologiczną i społeczną egzystencję najuboższych obywateli [Szczepkowski, 2017]. Z kolei drastyczne podniesienie kwoty wolnej do poziomu 30 000 zł, jakie miało miejsce w ramach wdrażania szerokich reform podatkowych, stanowiło potężny impuls dochodowy dla gospodarstw domowych oraz znaczące obciążenie dla sektora finansów publicznych [NBP, 2022; Projekt ustawy, 2021]. Należy jednak stale pamiętać, że w warunkach nasilonych szoków podażowych i globalnych zaburzeń w łańcuchach dostaw, nadmierna stymulacja popytu konsumpcyjnego może przekładać się na niebezpieczne utrwalenie wysokiej inflacji bazowej [NBP, 2022]. Celem niniejszego artykułu jest przeprowadzenie pogłębionej analizy makroekonomicznej wpływu zmian w kwocie wolnej od podatku na skłonność gospodarstw domowych do konsumpcji, popyt wewnętrzny oraz stabilność cen, przy uwzględnieniu specyficznych uwarunkowań dochodowych, strukturalnych i terytorialnych w Polsce w świetle najnowszych danych statystycznych [GUS, 2025; GUS, 2026; NBP, 2022; Szczepkowski, 2017].

2. Materiał i metody

Podstawę empiryczną przeprowadzonych badań naukowych stanowią masowe dane statystyczne Głównego Urzędu Statystycznego, pozyskane w ramach cyklicznych, reprezentatywnych badań budżetów gospodarstw domowych oraz urzędowych informacji sygnalnych publikowanych dla lat 2024–2025 [GUS, 2025; GUS, 2026]. Zbiory te pozwalają na rzetelną i wielowymiarową analizę struktury rozchodów i przychodów w przekroju różnych grup społeczno-ekonomicznych, w tym gospodarstw pracowniczych, rolniczych, emeryckich oraz prowadzonych przez osoby pracujące na własny rachunek [GUS, 2025; GUS, 2026]. W toku analizy uwzględniono również rezultaty szczegółowych badań nad minimum egzystencji i minimum socjalnym, opracowywanych cyklicznie przez odpowiednie instytuty badawcze, które stanowią obiektywny punkt odniesienia dla oceny adekwatności kwoty wolnej od podatku [Szczepkowski, 2017]. Warsztat badawczy uzupełniono o oficjalne raporty Narodowego Banku Polskiego, które dostarczają niezbędnego kontekstu analitycznego dotyczącego presji kosztowej, luki popytowej oraz procesów cenotwórczych w całej gospodarce narodowej [NBP, 2022]. Teoretyczna rama opracowania bazuje ściśle na literaturze naukowej z dziedziny ekonomii, finansów publicznych oraz modelowania matematycznego procesów decyzyjnych w polityce podatkowej [Grzesiak i Józwiak, 2018; Siwińska, 2005]. W procesie badawczym zastosowano zaawansowaną metodę analizy strukturalnej, analizę porównawczą oraz dedukcję makroekonomiczną, badając złożone relacje zachodzące między dynamiką dochodów rozporządzalnych, stopą oszczędności a strukturą wydatków konsumpcyjnych w ujęciu ogólnokrajowym oraz w szczegółowym przekroju decylowym i kwintylowym [GUS, 2025; GUS, 2026]. Zgodnie z oficjalnymi publikacjami źródłowymi, poziom przeciętnego miesięcznego dochodu rozporządzalnego na osobę w gospodarstwach domowych w 2024 roku wyniósł 3167 zł i był wyższy od dochodu z 2023 roku nominalnie o 18,3%, a w ujęciu realnym o 14,1% [GUS, 2025]. Z kolei w analizowanym roku 2025 wskaźnik ten osiągnął historycznie wysoką wartość 3500 zł, co oznaczało kontynuację realnego wzrostu o 6,7% w stosunku do roku ubiegłego [GUS, 2026]. Przyjęta metodologia badawcza uwzględnia ponadto kluczowe uwarunkowania prawne i instytucjonalne, w tym precedensowe orzecznictwo Trybunału Konstytucyjnego

z 28 października 2015 roku, które wiązało bezpośrednio konstrukcję kwoty wolnej od podatku z kategorią minimum egzystencji i wymusiło na ustawodawcy wprowadzenie mechanizmów korygujących tę kwotę [Szczepkowski, 2017]. Przeanalizowano również uwarunkowania legislacyjne wynikające z nowelizacji ustawy o podatku dochodowym od osób fizycznych, która całkowicie zredefiniowała zasady obliczania zaliczek oraz rocznego podatku należnego dla najniżej uposażonych podatników [Projekt ustawy, 2021]. Taki dobór wieloźródłowych materiałów i metod badawczych pozwala na wszechstronne ujęcie badanej problematyki badawczej i sformułowanie merytorycznie poprawnych oraz obiektywnych wniosków [Siwińska, 2005; Szczepkowski, 2017].

3. Wyniki i dyskusja

Modyfikacje w kwocie wolnej od podatku determinują bezpośrednio wielkość efektywnego klina podatkowego nakładanego na dochody z czynników wytwórczych, co stanowi fundamentalny bodziec ekonomiczny dla podmiotów gospodarujących i gospodarstw domowych [Grzesiak i Józwiak, 2018; Szczepkowski, 2017]. Zniesienie obciążeń podatkowych dla najniżej zarabiających, między innymi poprzez ustawowe ustalenie kwoty wolnej na poziomie 30 000 zł, sprawiło, że znaczna część świadczeń emerytalnych oraz osób pobierających płacę minimalną została wyłączona z opodatkowania podatkiem dochodowym od osób fizycznych [NBP, 2022; Projekt ustawy, 2021]. W latach 2024–2025 sytuacja dochodowa gospodarstw domowych w Polsce charakteryzowała się bardzo silną tendencją wzrostową, na co wpływ wywierał realny wzrost przeciętnych wynagrodzeń w sektorze przedsiębiorstw, dynamiczne podwyższanie ustawowego minimum płacowego, a także rozbudowa systemu transferów społecznych i rodzinnych [GUS, 2025; GUS, 2026]. W tym samym okresie polska gospodarka znajdowała się pod wpływem silnego szoku podażowego oraz zaburzeń w globalnych łańcuchach dostaw, co nieuchronnie wywoływało wyraźną presję inflacyjną widoczną w dynamice cen towarów i usług [NBP, 2022]. Nominalny i realny wzrost dochodów rozporządzalnych ludności znalazł jednak bezpośrednie odzwierciedlenie w ewolucji wielkości oraz ogólnej struktury wydatków konsumpcyjnych na rynku [GUS, 2025; GUS, 2026]. Dla precyzyjnego zobrazowania skali tych zmian w ujęciu dynamicznym sporządzono odpowiednie zestawienie tabelaryczne, które w sposób ciągły prezentuje kluczowe wskaźniki [GUS, 2025; GUS, 2026].

Tabela 1. Przeciętne miesięczne dochody, wydatki oraz skłonność do konsumpcji w gospodarstwach domowych w Polsce w latach 2023–2025 [GUS, 2025; GUS, 2026]

Wyszczególnienie	Rok 2023	Rok 2024	Rok 2025	Dynamika nominalna 2025/2024 (%)
Przeciętny dochód rozporządzalny na 1 osobę (zł)	2678	3167	3500	+10,5%
Przeciętne wydatki na 1 osobę (zł)	1636	1878	2015	+7,3%
Udział wydatków w dochodzie rozporządzalnym (%)	61,1%	59,3%	57,6%	-1,7 p. proc.

Źródło: Opracowanie własne na podstawie danych Głównego Urzędu Statystycznego [GUS, 2025; GUS, 2026].

Jak wynika z powyższych wyliczeń empirycznych, w latach 2024–2025 nastąpił niezwykle systematyczny spadek udziału wydatków konsumpcyjnych w przeciętnym dochodzie rozporządzalnym ogółu gospodarstw domowych [GUS, 2025; GUS, 2026]. Wskaźnik ten uległ obniżeniu z 61,1% w 2023 roku do 59,3% w 2024 roku, a następnie osiągnął optymalny poziom 57,6% w roku 2025 [GUS, 2025; GUS, 2026]. Obserwowane zjawisko dowodzi wprost rosnących przeciętnie możliwości akumulacji oszczędności przez sektor gospodarstw domowych w warunkach niezwykle silnej dynamiki dochodowej, co w ujęciu makroekonomicznym wybitnie sprzyja stabilizacji finansowej państwa [GUS, 2025; GUS, 2026]. Należy jednak krytycznie zaznaczyć, że reakcja konsumpcji na przyrosty dochodów wywołane impulsami fiskalnymi wykazuje drastyczne zróżnicowanie w układzie wyodrębnionych grup kwintylowych, ujawniając potężne nierówności dochodowe w społeczeństwie [GUS, 2025; GUS, 2026]. Wśród 20% osób o najniższych dochodach tworzących pierwszą grupę kwintylową wskaźnik udziału wydatków w dochodzie rozporządzalnym w 2025 roku osiągnął alarmujący, krytyczny poziom 117,9% [GUS, 2026]. Oznacza to w praktyce, że najuboższe gospodarstwa domowe zmuszone są do stałego uszczuplania zgromadzonych w przeszłości oszczędności lub pozyskiwania środków ze źródeł zwrotnych, takich jak pożyczki rynkowe, aby w pełni sfinansować swoje podstawowe, bieżące potrzeby egzystencjalne [GUS, 2026]. Zupełnie odmiennie sytuacja prezentuje się w piątej grupie kwintylowej, skupiającej osoby o najwyższych dochodach, gdzie wskaźnik ten wyniósł zaledwie 46,5%, odzwierciedlając bardzo wysoką stopę oszczędności i akumulacji kapitału tej warstwy społeczeństwa [GUS, 2026]. Zróżnicowanie to jest również bardzo silnie widoczne w przekroju terytorialnym, gdyż dochody w miastach były w 2025 roku średnio o 18,7% wyższe niż na obszarach wiejskich, co bezpośrednio determinowało odmienne wzorce konsumpcji i alokacji środków finansowych [GUS, 2026; Gutkowska i Piekut, 2014]. Z punktu widzenia zaawansowanej teorii ekonomii, modyfikacje w obszarze kwoty wolnej od podatku oddziałują w sposób wysoce zróżnicowany w zależności od naturalnej struktury popytowej oraz stopnia zamożności poszczególnych podmiotów [Siwińska, 2005]. Zgodnie z wiodącymi modelami opartymi na hipotezie dochodu permanentnego oraz nieliniowych efektach polityki fiskalnej, każda ekspansja budżetowa polegająca na redukcji obciążeń podatkowych przynosi zupełnie odmienne skutki w zależności od ogólnego stanu równowagi finansów publicznych kraju [Siwińska, 2005]. Gospodarstwa domowe charakteryzujące się niskimi dochodami odznaczają się jednocześnie bardzo wysoką krańcową skłonnością do konsumpcji [Siwińska, 2005]. Oznacza to zjawisko, w którym każda dodatkowa jednostka pieniężna pozostawiona w ich wolnej dyspozycji w wyniku podwyższenia kwoty wolnej od podatku zostaje natychmiast skierowana na zaspokojenie bieżących, dotychczas niezaspokojonych potrzeb konsumpcyjnych, w tym przede wszystkim na wyżywienie, zdrowie i stałe opłaty mieszkaniowe [GUS, 2025; GUS, 2026; Siwińska, 2005]. Mechanizm ten stymuluje bezpośrednio i błyskawicznie popyt wewnętrzny, co napędza koniunkturę gospodarczą w wymiarze krótkookresowym [Siwińska, 2005]. Jednakże instytucje nadzorujące stabilność makroekonomiczną, w tym NBP, zwracają uwagę, że w trudnym środowisku wysokiej presji kosztowej oraz ograniczonej podaży, silny wzrost popytu bezwzględnie ułatwia przedsiębiorstwom bezpośrednio przenoszenie rosnących kosztów własnych na ostateczne ceny finalne płacone przez konsumenta [NBP, 2022]. W konsekwencji taka ekspansja fiskalna wspierająca masowo dochody ludności może

drastycznie utrudniać dążenie do trwałego obniżenia inflacji, zmuszając równolegle niezależne władze monetarne do silniejszego zacieśniania polityki pieniężnej poprzez agresywne podwyżki stóp procentowych [NBP, 2022]. Z kolei w szerokim ujęciu historycznym, prawnym i instytucjonalnym, długoletnie zamrożenie nominalnej wartości kwoty wolnej od podatku w Polsce w latach 2007–2016 doprowadziło do drastycznej deprecjacji jej realnego znaczenia ekonomicznego na rynku [Szczepkowski, 2017]. Jak precyzyjnie wylicza w swoich badaniach analityk, udział kwoty wolnej od podatku w kwocie stanowiącej obiektywne minimum egzystencji dla typowego, jednoosobowego gospodarstwa domowego zmniejszył się z 67% w 2007 roku aż do rekordowo niskiego poziomu 47% w zbadanym 2016 roku [Szczepkowski, 2017]. Taka anomalia całkowicie wypaczała pierwotny, socjalny i redystrybucyjny wymiar tego instrumentu fiskalnego, czyniąc go w praktyce nieefektywnym z punktu widzenia ochrony najuboższych i najbardziej wrażliwych obywateli [Szczepkowski, 2017]. Z perspektywy teorii makroekonomii, nieliniowe i niekeynesowskie efekty polityki fiskalnej, gruntownie analizowane między innymi w teoretycznych modelach opracowanych przez Blancharda oraz Perottiego, wskazują na fundamentalną, psychologiczną rolę oczekiwań podmiotów gospodarczych co do stabilności zadłużenia publicznego w przyszłości [Siwińska, 2005]. Zbyt gwałtowna ekspansja fiskalna, która jest nieuzupełniona odpowiednimi reformami strukturalnymi po stronie wydatkowej państwa i prowadzona w warunkach niebezpiecznie narastającej nierównowagi budżetowej, może wywołać rynkowe skutki całkowicie odwrotne do zamierzonych przez dany rząd [Siwińska, 2005]. W takich ryzykownych warunkach konsumenci o wyższych dochodach, trafnie przewidując konieczność przyszłego, drastycznego wzrostu opodatkowania w celu obsługi narastającego długu, mogą proaktywnie i racjonalnie ograniczać swoją bieżącą konsumpcję i celowo zwiększać oszczędności zabezpieczające przed niepewnością gospodarczą [Siwińska, 2005]. W konsekwencji proces optymalnego projektowania zmian w czułych parametrach fiskalnych, takich jak kwota wolna od podatku, wymaga skomplikowanego, wielokryterialnego bilansowania krótkookresowych skutków wspierających najuboższych z długookresową reakcją inflacyjną i fiskalną w skali całej gospodarki narodowej [NBP, 2022; Siwińska, 2005; Szczepkowski, 2017].

4. Wnioski

Przeprowadzona w niniejszym obszernym artykule wieloaspektowa analiza makroekonomiczna pozwala sformułować spójne wnioski końcowe, ujęte w formie tekstu ciągłego. Z przeprowadzonych badań jednoznacznie i dobitnie wynika, że modyfikacje w kwocie wolnej od podatku stanowią niezwykle potężny instrument strukturalny współczesnej polityki fiskalnej państwa, co zostało wykazane w analizie teoretycznej i empirycznej [Siwińska, 2005; Szczepkowski, 2017]. Narzędzie to bezpośrednio i wysoce skutecznie kształtuje wielkość ostatecznego dochodu rozporządzalnego polskich gospodarstw domowych oraz w ujęciu zagregowanym determinuje ich ogólną skłonność do bieżącej konsumpcji i długoterminowego oszczędzania [GUS, 2025; GUS, 2026]. Planowane stymulowanie popytu wewnętrznego poprzez radykalną redukcję efektywnych obciążeń podatkowych najsilniej i najszybciej oddziałuje na gospodarstwa domowe o skrajnie niskich i relatywnie średnich dochodach ze stosunku pracy lub świadczeń emerytalnych [Gutkowska i Piekut, 2014; Szczepkowski, 2017]. Te właśnie wrażliwe podmioty wykazują bowiem

najwyższą na rynku krańcową skłonnością do konsumpcji i w konsekwencji dokonują pełnego, natychmiastowego zagospodarowania uwolnionych środków finansowych na krajowym rynku dóbr i usług, realizując w ten sposób swoje odłożone w czasie, pilne potrzeby bytowe [Gutkowska i Piekut, 2014; Siwińska, 2005]. Równocześnie skuteczność makroekonomiczna tak prowadzonej polityki fiskalnej w zakresie realnego pobudzania koniunktury gospodarczej jest ściśle uwarunkowana bieżącym stanem równowagi sektora finansów publicznych oraz niezależnymi czynnikami o charakterze stricte podażowym [NBP, 2022; Siwińska, 2005]. W warunkach występowania poważnych zakłóceń budżetowych państwa oraz silnej, wywołanej globalnie presji inflacyjnej, nadmierna stymulacja dochodowa ludności może przekładać się bezpośrednio na niebezpieczne utrwalenie wzrostu cen konsumpcyjnych, znosząc tym samym wszelkie realne korzyści z wprowadzonych przez ustawodawcę obniżek podatków bezpośrednich [NBP, 2022]. Mimo bezsprzecznego zidentyfikowania tych powszechnych zagrożeń makroekonomicznych, bieżące utrzymanie sprawiedliwej i realnej relacji kwoty wolnej od podatku do rynkowej kategorii minimum egzystencji stanowi bezwzględny warunek konieczny dla zachowania prawidłowej funkcji społecznej opodatkowania dochodów osobistych obywateli [Szczepkowski, 2017]. Ten konkretny, stabilny mechanizm prawny jest całkowicie niezbędny dla efektywnego zabezpieczenia podstawowych warunków bytowych najuboższych warstw społeczeństwa oraz ostatecznej budowy w pełni sprawiedliwego systemu obciążeń daninowych w Polsce [Szczepkowski, 2017].

Bibliografia:

1. Adamowicz M. (2015). Miejsce rodzinnych gospodarstw rolnych we Wspólnej Polityce Rolnej UE. W: M. Podstawka (red.), *Ekonomiczne i prawne mechanizmy wspierania i ochrony rolnictwa rodzinnego. Praca zbiorowa* (s. 122–141). Warszawa: Agrotec Polska.
2. Adamowicz M., Szepeluk A. (2016). Wsparcie młodych rolników jako element polityki rolnej Unii Europejskiej. *Zagadnienia Ekonomiki Rolnej*, 3, s. 106–128.
3. Główny Urząd Statystyczny (GUS) (2025). *Budżety gospodarstw domowych w 2024 r.* Warszawa: Zakład Wydawnictw Statystycznych.
4. Główny Urząd Statystyczny (GUS) (2026). *Sytuacja gospodarstw domowych w 2025 r. w świetle wyników badania budżetów gospodarstw domowych.* Informacje Sygnałne, Warszawa.
5. Grzesiak S., Jóźwiak R. (2018). Wpływ nowych regulacji podatkowo-socjalnych w Polsce na proces planowania transgranicznej działalności gospodarczej. *Studia Ekonomiczne. Zeszyty Naukowe Uniwersytetu Ekonomicznego w Katowicach*, 364, s. 72–85.
6. Gutkowska K., Piekut M. (2014). Konsumpcja w wiejskich gospodarstwach domowych. *Więś i Rolnictwo*, 4 (165), s. 159-177.
7. Narodowy Bank Polski (NBP) (2022). *Raport o inflacji - lipiec 2022 r.* Warszawa.
8. Projekt ustawy o zmianie ustawy o podatku dochodowym od osób fizycznych, ustawy o podatku dochodowym od osób prawnych oraz niektórych innych ustaw, Druk nr 1532, Warszawa, 8 września 2021 r.

9. Rozporządzenie Ministra Rolnictwa i Rozwoju Wsi z dnia 12 marca 2015 r. w sprawie szczegółowych warunków i trybu przyznawania płatności bezpośrednich i płatności niezwiązanej do tytoniu. Tj. Dz. U. RP z dnia 13 marca 2015 r. Poz. 351.
10. Siwińska J. (2005). Wpływ polityki fiskalnej na konsumpcję gospodarstw domowych w krajach Unii Europejskiej. *Gospodarka Narodowa*, 7-8, s. 86–100.
11. Stefańska K. (2011). Sytuacja prawna młodych rolników w procesie zmiany generacji w rolnictwie. *Studia Iuridica Agraria*, 9, s. 172–184.
12. Szczepkowski M. (2017). Kwota wolna od podatku w Polsce w kontekście minimum egzystencji i minimum socjalnego. *Prace Naukowe Uniwersytetu Ekonomicznego we Wrocławiu*, 488, s. 246–254.

3. NEGOCJACJE I MEDIACJE JAKO NARZĘDZIA ROZWIĄZYWANIA KONFLIKTÓW W SEKTORZE EDUKACJI NA PRZYKŁADZIE STRAJKU NAUCZYCIELI W POLSCE W 2019 ROKU

Piotr Barcik

Uniwersytet Bielsko-Bialski

Wydział Zarządzania i Transportu

E-mail: barcik.piotr00@gmail.com

1. Wstęp

Konflikt jest naturalnym elementem funkcjonowania jednostek, grup społecznych oraz organizacji. Może pojawiać się wszędzie tam, gdzie występują odmienne interesy, potrzeby, cele lub wartości. Nie każda sytuacja konfliktowa musi jednak prowadzić do negatywnych konsekwencji. Odpowiednio rozpoznany i właściwie prowadzony konflikt może stać się impulsem do zmiany, usprawnienia relacji pomiędzy stronami oraz poszukiwania nowych sposobów realizacji ich potrzeb. Znaczenie ma zatem nie tylko sam fakt wystąpienia konfliktu, lecz przede wszystkim sposób reagowania uczestników na pojawiające się różnice.

W literaturze przedmiotu konflikt przedstawiany jest jako zjawisko wielowymiarowe, którego źródłem mogą być zarówno obiektywne rozbieżności interesów, jak i subiektywne postrzeganie sytuacji, emocje czy sposób komunikowania się stron [Roszkowska, 2011]. B. Mayer podkreśla natomiast znaczenie niezaspokojonych potrzeb, komunikacji, emocji, wartości, relacji oraz kontekstu historycznego dla powstawania i eskalacji konfliktów [Mayer, 2000]. Takie ujęcie pozwala spojrzeć na konflikt nie tylko jako na spór o konkretną kwestię, lecz jako na proces, w którym poszczególne problemy mogą się ze sobą łączyć i wzajemnie wzmacniać.

Jednym z najbardziej wyrazistych przykładów konfliktu społecznego w polskiej oświacie był ogólnopolski strajk nauczycieli w 2019 roku. Protest rozpoczął się 8 kwietnia i został zawieszony 27 kwietnia 2019 roku. Bezpośrednim przedmiotem sporu były przede wszystkim kwestie wynagrodzeń, jednak już sama analiza przebiegu konfliktu wskazuje, że nie ograniczał się on wyłącznie do problemu finansowego. W tle znajdowały się także kwestie warunków pracy, pozycji społecznej zawodu nauczyciela, kierunku zmian w systemie edukacji oraz jakości dialogu pomiędzy środowiskiem nauczycielskim a władzami publicznymi. Konflikt ten stał się przykładem sytuacji, w której narastające niezadowolenie doprowadziło do eskalacji i zastosowania strajku jako formy nacisku.

Ważną rolę w rozwiązywaniu konfliktów mogą odgrywać negocjacje i mediacje. Negocjacje zakładają bezpośredni udział stron w poszukiwaniu rozwiązania problemu, natomiast mediacja wprowadza do procesu bezstronną osobę trzecią, której zadaniem jest wspieranie komunikacji i ułatwianie osiągnięcia dobrowolnego porozumienia [Bargiel-Matusiewicz, 2010; Moore, 2014]. Skuteczność obu metod zależy jednak nie tylko od formalnego istnienia możliwości prowadzenia rozmów, ale również od przygotowania uczestników, ich zdolności do komunikacji oraz rzeczywistej gotowości do kompromisu.

Celem niniejszego artykułu jest analiza roli i skuteczności negocjacji oraz mediacji w rozwiązywaniu konfliktów w sektorze edukacji na przykładzie strajku nauczycieli w Polsce w 2019 roku. Szczególna uwaga została poświęcona temu, jak badani nauczyciele oceniali przebieg negocjacji z rządem, możliwość wpływania na proces negocjacyjny, działania związków zawodowych, znaczenie prób mediacji oraz skuteczność samego strajku.

Opracowanie opiera się na badaniach własnych autora. Materiał został uporządkowany i zredagowany w formie artykułu naukowego, a część teoretyczna została ograniczona do zagadnień bezpośrednio związanych z przedmiotem analizy. Wykorzystane koncepcje innych autorów są wskazywane za pomocą odsyłaczy bibliograficznych, natomiast wyniki badań empirycznych są przedstawione jako badania własne autora.

2. Materiał i badania

Badanie przeprowadzone zostało w podejściu jakościowym. Jako podstawowe narzędzie badawcze zastosowano wywiad, ponieważ jego zastosowanie umożliwia poznanie indywidualnych doświadczeń, opinii oraz sposobu postrzegania badanego zjawiska przez uczestników. W odróżnieniu od metod ilościowych wywiad pozwala respondentowi rozwijać odpowiedzi, a badaczowi zadawać pytania uzupełniające, dzięki czemu uzyskany materiał może być bardziej szczegółowy [Konecki, 2012; Babbie, 2015; Flick, 2010]. W przypadku konfliktu społecznego, którego znaczną część stanowią doświadczenia, emocje i oceny uczestników, takie podejście było uzasadnione.

Badanie zostało przeprowadzone w formie półstrukturyzowanych wywiadów z dwoma nauczycielami zatrudnionymi w szkołach publicznych. Każdy z respondentów posiadał ponad piętnastoletni staż pracy. Respondenci różnili się stopniem osobistego zaangażowania w strajk nauczycieli w 2019 roku. Nauczyciel 1 nie uczestniczył bezpośrednio w proteście, natomiast Nauczyciel 2 brał w nim udział i określił strajk jako „ostateczność”. Dla zachowania anonimowości w badaniu zastosowano oznaczenia „Nauczyciel 1” i „Nauczyciel 2”. Dane dotyczące grupy badawczej oraz sposobu przeprowadzenia wywiadów odpowiadają założeniom przedstawionym w analizowanym opracowaniu.

Dyspozycja do wywiadu obejmowała cztery podstawowe obszary tematyczne. Pierwszy dotyczył doświadczeń związanych ze strajkiem, w tym udziału w proteście, jego głównych przyczyn oraz atmosfery panującej wśród nauczycieli. Drugi odnosił się do negocjacji, a więc wpływu nauczycieli na rozmowy z rządem, oceny działań związków zawodowych, największych problemów pojawiających się podczas rozmów oraz otwartości rządu na dialog. Trzeci obszar obejmował mediacje i inne sposoby rozwiązywania konfliktu. Respondenci byli pytani między innymi o korzystanie z pomocy mediatorów, wcześniejsze formy protestu oraz możliwość zastosowania mediacji w przyszłości. Czwarty obszar dotyczył skuteczności strajku, doświadczeń wynikających z protestu oraz sposobów prowadzenia przyszłych negocjacji.

Analiza materiału miała charakter tematyczny. Odpowiedzi respondentów zestawiono wokół najważniejszych problemów związanych z konfliktem: przyczyn protestu, atmosfery w środowisku nauczycielskim, przebiegu negocjacji, roli związków zawodowych, wykorzystania mediacji, skuteczności strajku oraz możliwości poprawy przyszłego dialogu. Następnie wyniki zestawiono z zagadnieniami teoretycznymi przedstawionymi w analizowanym opracowaniu.

Istotnym ograniczeniem badania jest niewielka liczebność grupy. Dwa wywiady nie pozwalają na uznanie wyników za reprezentatywne dla całego środowiska nauczycielskiego. Ich wartość polega na pogłębieniu dwóch indywidualnych perspektyw osób posiadających wieloletnie doświadczenie zawodowe i związanych z analizowanym konfliktem. Drugim ograniczeniem jest koncentracja przede wszystkim na perspektywie nauczycieli. W badaniu nie uwzględniono bezpośrednich wywiadów z przedstawicielami rządu, związków zawodowych, dyrektorów szkół ani innych podmiotów uczestniczących w sporze.

Takie ograniczenia nie oznaczają jednak, że badanie nie ma wartości poznawczej. Badania jakościowe nie zawsze mają na celu statystyczne uogólnienie wyników. Ich znaczenie może polegać na pogłębionym poznaniu sposobu, w jaki uczestnicy określonego zjawiska postrzegają jego przebieg i znaczenie. W przypadku niniejszego opracowania pozwala to skoncentrować uwagę na doświadczeniach nauczycieli i ich ocenie skuteczności dostępnych metod rozwiązywania konfliktu.

3. Wyniki i dyskusja

3.1. Źródła konfliktu

Analiza wypowiedzi respondentów wskazuje, że podstawową przyczyną protestu były kwestie finansowe. Obaj nauczyciele wskazali niskie wynagrodzenia jako główny powód strajku. Nauczyciel 1 mówił o zarobkach „niewiele wyższych od najniższej krajowej”, natomiast Nauczyciel 2 również podkreślał niski poziom wynagrodzeń, wskazując jednocześnie na brak perspektyw zawodowych, ignorowanie postulatów nauczycieli oraz brak szacunku dla zawodu.

Wyniki te potwierdzają, że analizowany konflikt miał charakter wielowymiarowy. Problem finansowy był bezpośrednim i najbardziej widocznym przedmiotem sporu, ale nie wyczerpywał wszystkich przyczyn niezadowolenia. Wypowiedzi respondentów pokazują także znaczenie potrzeb związanych z uznaniem, poczuciem sprawiedliwego traktowania i możliwością wpływania na decyzje dotyczące środowiska zawodowego.

Takie ujęcie jest zgodne z koncepcją B. Mayera, według którego konflikty mogą wynikać z niezaspokojonych potrzeb oraz pozostawać w związku z komunikacją, emocjami, relacjami i kontekstem historycznym [Mayer, 2000]. W analizowanym przypadku potrzeba poprawy sytuacji materialnej była połączona z potrzebą szacunku i uznania dla zawodu nauczyciela. Wypowiedź Nauczyciela 2, który stwierdził, że nie chodziło wyłącznie o pieniądze, ale również o szacunek, dobrze pokazuje to połączenie.

Znaczenie emocji widoczne było także w sposobie opisywania atmosfery podczas strajku. Nauczyciel 1 wskazywał na bardzo pesymistyczne nastroje i przekonanie, że nauczyciele zostali potraktowani wyjątkowo źle. Nauczyciel 2 opisywał natomiast początkową jedność i determinację, które w dalszej części protestu zostały osłabione przez sposób przedstawiania strajkujących oraz brak oczekiwanej reakcji ze strony władz.

Z punktu widzenia teorii konfliktu jest to istotne, ponieważ silne emocje mogą wpływać na dalszą eskalację sporu. Roszkowska wskazuje, że konflikt jest procesem dynamicznym, w którym wraz z rozwojem sporu mogą zmieniać się zachowania stron, sposób postrzegania przeciwnika oraz zakres konfliktu [Roszkowska, 2011]. W przypadku

strajku nauczycieli konflikt dotyczący wynagrodzeń został rozszerzony o ocenę relacji pomiędzy środowiskiem nauczycielskim a władzą.

3.2. Przebieg negocjacji

Najbardziej jednoznaczne stanowisko respondentów dotyczyło wpływu nauczycieli na przebieg negocjacji z rządem. Obaj badani wskazali, że nauczyciele nie mieli realnego wpływu na rozmowy. Nauczyciel 1 odpowiedział po prostu „Nie” na pytanie o wpływ nauczycieli. Nauczyciel 2 stwierdził natomiast, że postulaty były przekazywane przez związki zawodowe, ale nauczyciele mieli wrażenie, iż decyzje zapadały zanim ich stanowisko zostało rzeczywiście wysłuchane.

Zjawisko to można zestawić z rozumieniem negocjacji jako procesu, w którym strony dążą do uzgodnienia stanowisk poprzez komunikowanie swoich oczekiwań i poszukiwanie możliwego do zaakceptowania rozwiązania [Bargiel-Matusiewicz, 2010]. Sam fakt prowadzenia rozmów nie przesądza jednak o ich skuteczności. Jeżeli jedna lub obie strony postrzegają proces jako zamknięty albo pozorny, możliwości osiągnięcia kompromisu znacząco się zmniejszają.

W tym kontekście istotne jest podejście R. Fishera i W. Ury’ego, którzy zwracają uwagę na znaczenie oddzielenia ludzi od problemu, koncentracji na interesach zamiast samych stanowisk oraz tworzenia możliwych wariantów rozwiązania [Fisher, Ury i Patton, 2004]. Rozwiązanie konfliktu wymaga zatem nie tylko zaprezentowania własnych żądań, lecz także rozpoznania interesów drugiej strony.

W przypadku analizowanego strajku respondenci nie dostrzegali warunków umożliwiających pełne zastosowanie takiego modelu. Nauczyciel 1 stwierdził, że rząd „w zasadzie nie chciał rozmawiać”, natomiast Nauczyciel 2 mówił o braku dobrej woli i niechęci do kompromisu. Są to subiektywne oceny badanych, dlatego nie powinny być przedstawiane jako obiektywnie udowodniony fakt dotyczący intencji strony rządowej. Ich znaczenie polega jednak na tym, że podobna ocena pojawiła się w obu niezależnych wywiadach i była ważnym elementem ich doświadczenia konfliktu.

3.3. Rola związków zawodowych

Respondenci stosunkowo pozytywnie oceniali działania związków zawodowych. Nauczyciel 1 określił je jako dobre. Nauczyciel 2 wskazywał na sprawną organizację oraz regularną komunikację z nauczycielami, szczególnie w odniesieniu do Związku Nauczycielstwa Polskiego. Jednocześnie podkreślał, że związki nie miały właściwego partnera do prowadzenia rozmów.

Wynik ten jest interesujący, ponieważ pokazuje różnicę pomiędzy skutecznością organizacyjną a skutecznością negocjacyjną. Strona może być dobrze przygotowana do reprezentowania interesów własnej grupy i sprawnie przekazywać informacje, a mimo to nie osiągnąć porozumienia, jeżeli druga strona nie wykazuje podobnej gotowości do negocjacji.

Z perspektywy zarządzania konfliktem istotne jest zatem postrzeganie negocjacji jako relacji dwustronnej. Nie można oceniać skuteczności negocjatora wyłącznie przez pryzmat jego własnych działań. Znaczenie ma również struktura konfliktu, siła przetargowa stron, dostęp do informacji oraz możliwość podejmowania decyzji [Bargiel-Matusiewicz, 2010].

3.4. Mediacja jako możliwe narzędzie deeskalacji

Drugim ważnym obszarem badania była mediacja. W literaturze C.W. Moore przedstawia ją jako proces, w którym neutralna osoba trzecia wspiera strony w komunikacji i poszukiwaniu rozwiązania konfliktu [Moore, 2014]. Istotą mediacji jest dobrowolność oraz zachowanie wpływu stron na końcowy rezultat. Mediator nie zastępuje stron w podejmowaniu decyzji, lecz pomaga stworzyć warunki do rozmowy.

Mediacja opiera się na dialogu, współpracy i wzajemnym szacunku. Jej celem jest nie tylko osiągnięcie porozumienia, ale także zmniejszenie napięć, poprawa komunikacji i lepsze rozpoznanie potrzeb uczestników konfliktu.

Odpowiedzi respondentów dotyczące mediacji były mniej jednoznaczne niż w przypadku negocjacji. Nauczyciel 1 nie pamiętał, czy podczas konfliktu korzystano z pomocy mediatorów. Nauczyciel 2 wskazywał natomiast na próby zaangażowania Rzecznika Praw Obywatelskich oraz Kościoła, przy czym stwierdził, że działania te nie doprowadziły do zakończenia konfliktu. Jednocześnie uważał, że profesjonalnie przeprowadzona mediacja mogłaby przynieść lepszy efekt.

W tym miejscu konieczne jest rozróżnienie pomiędzy mediacją jako profesjonalnym procesem a szeroko rozumianymi próbami pośredniczenia. Z materiału badawczego nie wynika, że w analizowanym konflikcie przeprowadzono pełny proces mediacyjny zgodny ze standardami opisanymi w literaturze. Nie można więc wyciągnąć wniosku, że „mediacja była nieskuteczna”. Bardziej uzasadnione jest stwierdzenie, że możliwości profesjonalnego wykorzystania mediacji były niewystarczające, a podejmowane próby pośrednictwa nie doprowadziły do wymiernego rozwiązania konfliktu.

Takie rozróżnienie ma znaczenie metodologiczne i chroni przed nadinterpretacją wyników. Badanie pozwala powiedzieć, jak respondenci postrzegali próby mediacyjne i jaki potencjał przypisywali profesjonalnemu mediatorowi, ale nie pozwala ocenić skuteczności pełnego procesu mediacyjnego, skoro taki proces nie został w badaniu potwierdzony.

3.5. Kontekst strajku nauczycieli w 2019 roku

Analiza wypowiedzi respondentów powinna być uzupełniona o szerszy kontekst wydarzeń. Strajk rozpoczął się 8 kwietnia 2019 roku i zakończył się zawieszeniem 27 kwietnia. ZNP wraz z Forum Związków Zawodowych domagały się jednorazowego wzrostu wynagrodzenia zasadniczego o 1000 zł brutto od stycznia 2019 roku. Strona rządowa proponowała natomiast stopniowe i niższe podwyżki. Według danych związkowych przywołanych w analizowanym materiale w proteście uczestniczyło około 75% placówek oświatowych. Protest przypadł na okres egzaminów gimnazjalnych i ósmoklasistów, co zwiększało jego znaczenie społeczne.

W literaturze poświęconej strajkowi wskazywano również na wcześniejsze zmiany w systemie edukacji oraz problemy związane z reformami wprowadzanymi po 2015 roku [Ziółkowski, 2019]. W analizowanym przypadku kwestie płacowe połączyły się więc z szerszym niezadowoleniem dotyczącym funkcjonowania systemu edukacji i sytuacji zawodowej nauczycieli.

Znaczenie kontekstu jest szczególnie widoczne w odniesieniu do teorii dynamiki konfliktu. Konflikt rozwijający się w warunkach silnej presji społecznej, dużego zainteresowania opinii publicznej oraz wysokich emocji staje się trudniejszy do deeskalacji.

Każda ze stron może zacząć zwracać większą uwagę na utrzymanie własnej pozycji niż na poszukiwanie wspólnego rozwiązania. W przypadku strajku nauczycieli dodatkowym czynnikiem była presja związana z egzaminami oraz sytuacją uczniów.

3.6. Ocena skuteczności strajku

Respondenci krytycznie oceniali skuteczność strajku w zakresie osiągnięcia zakładanych celów. Nauczyciel 1 stwierdził, że „nic się nie zmieniło”. Nauczyciel 2 również uważał, że mimo dużego zaangażowania środowiska działania rządu ograniczyły efekty protestu.

Jednocześnie Nauczyciel 2 zwrócił uwagę na znaczenie protestu z punktu widzenia opinii publicznej. Wskazał, że wcześniejsze działania, takie jak petycje, pikety i konsultacje społeczne, nie przynosiły oczekiwanych rezultatów, natomiast dopiero strajk zwrócił uwagę społeczeństwa na problemy środowiska nauczycielskiego.

Pozwala to wyróżnić dwa sposoby oceny skuteczności protestu. Pierwszy dotyczy bezpośredniego osiągnięcia celów negocjacyjnych. W tym zakresie badani oceniali rezultat negatywnie. Drugi dotyczy zdolności protestu do zwiększenia społecznej widoczności problemu. W tym wymiarze strajk miał znaczenie komunikacyjne, ponieważ przyczynił się do szerokiej debaty na temat sytuacji zawodowej nauczycieli i funkcjonowania systemu edukacyjnego.

Nie oznacza to jednak, że strajk można uznać za skuteczny w sensie rozwiązania konfliktu. Nie doszło bowiem do pełnego porozumienia pomiędzy stronami, a respondenci nadal postrzegali wiele problemów jako nierozwiązane. Analiza własnego materiału badawczego wskazuje więc raczej na ograniczoną skuteczność protestu w wymiarze negocjacyjnym przy jednoczesnym istotnym efekcie społecznym.

3.7. Negocjacje i mediacje a warunki skutecznego rozwiązania konfliktu

Wyniki badania można odnieść do szerszego pytania o to, jakie warunki muszą zostać spełnione, aby negocjacje lub mediacje rzeczywiście przyczyniały się do rozwiązania konfliktu. Literatura wskazuje na znaczenie odpowiedniego przygotowania, komunikacji, rozpoznania interesów, kontroli emocji oraz elastyczności w doborze sposobu działania [Roszkowska, 2011; Mayer, 2000].

W odniesieniu do analizowanego przypadku szczególnie istotny jest problem wzajemnej gotowości stron. Jeżeli jedna strona uważa, że druga nie zamierza prowadzić rzeczywistego dialogu, sam fakt formalnego rozpoczęcia negocjacji nie wystarcza do uzyskania porozumienia. Podobnie mediator może pomóc w uporządkowaniu komunikacji, ale nie jest w stanie samodzielnie wymusić dobrej woli stron.

Wypowiedzi respondentów wskazują właśnie na ten problem. Nauczyciel 2 podkreślał, że profesjonalna mediacja mogłaby pomóc w sytuacji, gdyby istniał bezstronny mediator oraz wola współpracy. Taka wypowiedź jest zgodna z podstawowym założeniem mediacji, zgodnie z którym mediator nie podejmuje decyzji za strony, lecz pomaga im samodzielnie dojść do rozwiązania [Moore, 2014].

Warto również zwrócić uwagę na rolę komunikacji. W analizowanym konflikcie problemem było nie tylko to, że strony miały różne stanowiska, ale również to, że uczestnicy badania nie mieli poczucia, iż ich argumenty są rzeczywiście brane pod uwagę. Brak

możliwości wywierania wpływu na proces decyzyjny może zwiększać frustrację i sprzyjać eskalacji konfliktu.

W odniesieniu do przyszłych sporów ważne jest zatem budowanie mechanizmów umożliwiających prowadzenie dialogu przed osiągnięciem przez konflikt stadium otwartego protestu. Wskazuje to na potrzebę większego udziału przedstawicieli nauczycieli w gremiach doradczych i negocjacyjnych, rozwijania mechanizmów konsultacji oraz profesjonalizacji mediacji.

Jednocześnie rekomendacje te należy traktować jako konsekwencję przeprowadzonej analizy, a nie jako nowe wyniki empiryczne. Badanie dwóch nauczycieli nie pozwala na formułowanie szerokich twierdzeń dotyczących całego systemu edukacji. Pozwala natomiast wskazać problemy, które z perspektywy badanych były szczególnie istotne i które mogą stanowić punkt wyjścia do dalszych badań.

3.8. Ograniczenia badania i znaczenie wyników

Niewielka liczebność próby jest najważniejszym ograniczeniem badania. Dwóch respondentów nie może reprezentować całego środowiska nauczycielskiego. Wypowiedzi pokazują jedynie dwie indywidualne perspektywy. Nie można na ich podstawie określić częstotliwości występowania danych opinii w całej populacji nauczycieli.

Drugim ograniczeniem jest brak bezpośredniej perspektywy pozostałych stron konfliktu. Nie przeprowadzono wywiadów z przedstawicielami rządu, związków zawodowych czy dyrektorami szkół. Oznacza to, że wyników nie należy wykorzystywać do pełnej, wielostronnej oceny negocjacji. Można natomiast analizować doświadczenia nauczycieli i ich sposób postrzegania konfliktu.

Trzecie ograniczenie wiąże się z retrospektywnym charakterem części wypowiedzi. Respondenci odnosili się do wydarzeń z 2019 roku, dlatego ich relacje należy traktować jako pamięciową rekonstrukcję doświadczeń. W przypadku badań jakościowych tego rodzaju perspektywa ma jednak znaczenie, ponieważ pozwala uchwycić nie tylko przebieg wydarzeń, ale także sposób, w jaki uczestnicy nadają im znaczenie z perspektywy czasu.

Pomimo tych ograniczeń można wskazać kilka spójnych elementów. Obaj respondenci uznali wynagrodzenia za główny problem, wskazywali na brak realnego wpływu nauczycieli na negocjacje, pozytywnie oceniali organizacyjną rolę związków zawodowych, krytycznie oceniali skuteczność strajku i dostrzegali możliwość wykorzystania profesjonalnej mediacji w przyszłości.

Zgodność tych elementów nie oznacza jednak, że można na jej podstawie mówić o całym środowisku nauczycielskim. Pokazuje natomiast, że problem jakości dialogu był wyraźnie obecny w obu badanych doświadczeniach.

4. Wnioski

Przeprowadzona analiza wskazuje, że strajk nauczycieli w Polsce w 2019 roku był konfliktem wielowymiarowym. Wynagrodzenia stanowiły główny wskazywany przez respondentów powód protestu, jednak kwestie ekonomiczne współwystępowały z problemami dotyczącymi warunków pracy, perspektyw zawodowych, szacunku dla zawodu nauczyciela oraz poczucia wpływu na podejmowane decyzje. Oznacza to, że źródeł konfliktu nie należy ograniczać wyłącznie do kwestii finansowych, ponieważ obejmowały one również potrzeby

związane z uznaniem, sprawiedliwym traktowaniem oraz możliwością uczestniczenia w procesach decyzyjnych.

Wyniki badania wskazują również na ograniczoną skuteczność negocjacji z perspektywy badanych nauczycieli. Obaj respondenci nie mieli poczucia rzeczywistego wpływu na proces rozmów z rządem, a jako istotny problem wskazywali brak warunków do prowadzenia autentycznego dialogu. Jednocześnie pozytywnie oceniali organizacyjne działania związków zawodowych. Pozwala to zwrócić uwagę na różnicę pomiędzy sprawnym reprezentowaniem interesów określonej grupy a możliwością osiągnięcia rzeczywistego porozumienia z drugą stroną konfliktu.

Materiał badawczy nie daje podstaw do uznania, że w analizowanym konflikcie przeprowadzono pełnoprawny, profesjonalny proces mediacyjny. Respondenci wskazywali na różnego rodzaju próby pośrednictwa, jednak działania te nie doprowadziły do rozwiązania konfliktu. Jednocześnie badani dostrzegali możliwość wykorzystania profesjonalnej mediacji w przyszłości. Wskazuje to, że nie należy utożsamiać nieskuteczności podejmowanych prób pośrednictwa z nieskutecznością mediacji jako metody rozwiązywania konfliktów. Skuteczność mediacji zależy bowiem między innymi od odpowiedniego przygotowania procesu, obecności bezstronnego mediatora oraz rzeczywistej gotowości stron do współpracy.

Na uwagę zasługuje również sposób oceniania skuteczności samego strajku. W zakresie realizacji podstawowych celów negocjacyjnych respondenci byli krytyczni i wskazywali na ograniczone efekty protestu. Jednocześnie dostrzegali jego znaczenie społeczne, związane ze zwiększeniem widoczności problemów środowiska nauczycielskiego oraz wywołaniem szerszej debaty dotyczącej sytuacji zawodowej nauczycieli i funkcjonowania systemu edukacji. Ostateczna ocena skuteczności strajku powinna zatem uwzględniać zarówno wymiar negocjacyjny, jak i społeczny oraz komunikacyjny.

Analiza pozwala ponadto wskazać znaczenie odpowiednio wczesnego reagowania na konflikty w sektorze edukacji. Przyszłe spory powinny być rozwiązywane możliwie wcześnie, zanim dojdzie do ich znacznej eskalacji. Istotne mogą być stałe mechanizmy konsultacyjne, zwiększenie udziału przedstawicieli nauczycieli w procesach podejmowania decyzji oraz możliwość skorzystania z niezależnego mediatora. Samo stworzenie formalnych możliwości prowadzenia negocjacji lub mediacji nie jest jednak wystarczające. Osiągnięcie porozumienia wymaga również gotowości stron do rozmowy, wzajemnego szacunku, odpowiedniego przygotowania, dobrej komunikacji oraz koncentracji na rzeczywistych interesach uczestników konfliktu.

Najważniejszym rezultatem przeprowadzonej analizy jest wskazanie, że skuteczne rozwiązywanie konfliktów w edukacji wymaga nie tylko zastosowania odpowiednich narzędzi, lecz także stworzenia odpowiedniej kultury dialogu. Negocjacje i mediacje mogą ograniczać eskalację konfliktu oraz tworzyć warunki do osiągnięcia porozumienia, ale ich skuteczność jest uzależniona od rzeczywistej gotowości wszystkich stron do uczestniczenia w procesie i poszukiwania rozwiązania możliwego do zaakceptowania przez uczestników sporu.

Wnioski te należy traktować jako rezultat analizy dwóch indywidualnych perspektyw, a nie jako reprezentatywną ocenę całego środowiska nauczycielskiego. Ograniczona liczebność grupy badawczej oraz brak bezpośredniej perspektywy przedstawicieli rządu, związków zawodowych, dyrektorów szkół i innych uczestników konfliktu powodują, że

przedstawione ustalenia nie mogą być uogólniane na całą populację nauczycieli. Stanowią jednak wartościowy punkt wyjścia do dalszych badań nad znaczeniem negocjacji, mediacji i innych metod rozwiązywania konfliktów w sektorze edukacji.

Bibliografia:

1. Babbie M. (2015). *Badania społeczne w praktyce*. Warszawa: PWN.
2. Bargiel-Matusiewicz K. (2010). *Negocjacje i mediacje*. Warszawa: Polskie Wydawnictwo Ekonomiczne.
3. Fisher R., Ury W., Patton B. (2004). *Dochodząc do TAK. Negocjowanie bez poddawania się*. Warszawa: PWE.
4. Flick U. (2010). *Projektowanie badania jakościowego*. Warszawa: Wydawnictwo Naukowe PWN.
5. Konecki K. (2012). *Metody badań jakościowych w naukach społecznych*. Warszawa: PWN.
6. Mayer B. (2000). *The Dynamics of Conflict Resolution. A Practitioner's Guide*. San Francisco: Jossey-Bass.
7. Moore C.W. (2014). *The Mediation Process: Practical Strategies for Resolving Conflict*. San Francisco: Jossey-Bass.
8. Roszkowska E. (2011). *Wybrane modele negocjacji*. Białystok: Wydawnictwo Uniwersytetu w Białymstoku.
9. Ziółkowski P. (2019). Strajk nauczycieli w 2019 r. „Zeszyty Naukowe WSG”, t. 36, s. 248–250.

4. WPLYW MEDIÓW NA ZDROWIE SPOŁECZEŃSTWA

Emilia Huse

Collegium Medicum w Bydgoszczy, Uniwersytet Mikołaja Kopernika w Toruniu

Wydział Farmaceutyczny

ul. Jagiellońska 15, 85-067, Bydgoszcz

E-mail: 329793@stud.umk.pl

Abstrakt: Media społecznościowe jako jeden z najważniejszych elementów komunikacji społecznej i codziennego funkcjonowania ludzi, szczególnie wśród młodzieży i młodych dorosłych. Wraz ze wzrostem popularności platform takich jak Facebook, Instagram czy YouTube, rośnie zainteresowanie ich wpływem na zdrowie psychiczne internautów. Celem niniejszej pracy była analiza dostępnej literatury naukowej, dotyczącej zależności między aktywnym korzystaniem z mediów społecznościowych a zdrowiem psychicznym. Przeprowadzony przegląd recenzowanych publikacji naukowych objął badania dotyczące wpływu aktywności w mediach społecznościowych na występowanie objawów depresyjnych, lęku, zaburzeń samooceny, obrazu własnego ciała oraz funkcjonowania wśród społeczeństwa. Wyniki analizowanych badań wskazują, że wpływ mediów społecznościowych na zdrowie psychiczne ma charakter wielowymiarowy i niejednoznaczny. Część autorów nie wykazała związku pomiędzy czasem spędzonym w mediach społecznościowych a pogorszeniem funkcjonowania psychicznego i społecznego. Jednocześnie stwierdzono, że nadmierne korzystanie z mediów społecznościowych oraz wysoki poziom zaangażowania emocjonalnego w wirtualne życie mogą wiązać się nasilonymi objawami depresyjnymi. Przeprowadzona analiza sugeruje, że kluczowe znaczenie dla zdrowia psychicznego ma nie tylko czas korzystania z mediów społecznościowych, a także sposób ich użytkowania oraz poziom zaangażowania emocjonalnego. Konieczne są dalsze badania pozwalające na dokładniejsze określenie mechanizmów odpowiedzialnych za pozytywne i negatywne skutki korzystania z mediów społecznościowych oraz opracowanie skutecznych działań profilaktycznych i edukacyjnych.

1. Wprowadzenie

Media społecznościowe stały się nieodłączną częścią codzienności ludzi; wielu z nich spędza dziennie nawet godziny na Messengerze, Instagramie, Facebooku i innych popularnych platformach. Wówczas wielu badaczy i uczonych bada wpływ mediów na różne aspekty życia ludzi [Bartosik-Purgat i in., 2017, s. 181-191]. Ludzie są stworzeniami społecznymi, które wymagają kontaktów społecznych, aby móc poprawnie funkcjonować. Wówczas relacje z ludźmi mogą łagodzić stres, lęk i samotność, natomiast brak relacji może stanowić poważne zagrożenie dla zdrowia psychicznego [Mohamed i in., 2017, s. 83-92]. Media społecznościowe są źródłem wielu korzyści, natomiast bez wątpienia mogą być także przyczyną wielu problemów związanych ze zdrowiem psychicznym. Badania wykazały, że wiek nie miał bezpośredniego wpływu na te dolegliwości, w przeciwieństwie do płci; kobiety były znacznie bardziej narażone na problemy związane ze zdrowiem psychicznym niż mężczyźni [Iannotti i in., 2009, s. 191-198].

2. Zdrowie psychiczne

Zdrowie psychiczne jest zależne od stanu samopoczucia, często bezpośrednio związanego z samooceną, codziennymi problemami, nakładem pracy i aktywnością w życiu społeczeństwa [World Health Organization, 2004]. Obecnie toczy się debata na temat korzyści i negatywnych skutków mediów społecznościowych dla zdrowia psychicznego wśród społeczeństwa. Zarówno ilość, jak i jakość relacji społecznych wpływają na zdrowie psychiczne, zachowania zdrowotne, zdrowie fizyczne i ryzyko śmiertelności [Martinsen, 2008, s. 25-29]. Zgodnie z tą Displaced Behavior Theory, ludzie, którzy spędzają więcej czasu na zachowaniach siedzących, takich jak korzystanie z mediów społecznościowych, mają mniej czasu na bezpośrednie interakcje społeczne, z których obie formy okazały się zapobiegać zaburzeniom psychicznym [Coyne i in., 2020]. Z drugiej strony, teorie społeczne wykazały, w jaki sposób korzystanie z mediów społecznościowych wpływa na zdrowie psychiczne poprzez oddziaływanie na to, jak ludzie postrzegają, utrzymują i wchodzą w interakcje ze swoją siecią społeczną [Rahman i in., 2013, s. 76-81]. Ponadto media społecznościowe mogą wywierać dużą presję, aby dopasować się do stereotypu, który inni chcą widzieć, a także by być tak popularnym jak inni.

3. Przegląd systematyczny i kryteria wyboru badań

Badania mogą ilościowo i jakościowo zidentyfikować, zagregować i ocenić wszystkie dostępne dane w celu wygenerowania rzetelnej i dokładnej odpowiedzi na postawione pytania badawcze. Jednak tylko nieliczne badania integrują media społecznościowe i są prowadzone w kontekście nauk społecznych, ponieważ dostępna literatura skupia się głównie na naukach medycznych [Iannotti i in., 2009, s. 191-198]. Ze względu na to, że media społecznościowe są stosunkowo nowym zjawiskiem, potencjalne powiązania między ich używaniem a zdrowiem psychicznym nie zostały jeszcze wszechstronnie zbadane. Niniejsza praca podejmuje próbę systematycznego przeglądu istotnej literatury w celu zbadania wpływu mediów społecznościowych na zdrowie psychiczne, czyli zachowania „siedzącego”, które stosowane w nadmiarze – zwiększa ryzyko problemów zdrowotnych [Escobar-Viera i in., 2008, s. 25-29]. Do przeglądu włączono recenzowane artykuły badawcze z pełnym tekstem, w języku angielskim, natomiast artykuły nierecenzowane zostały wykluczone z ostatecznej analizy.

4. Wyniki

Tabela 1. Wyniki badań z przeglądu

Autor	Tytuł	Wynik
Berryman et al. [10]	Social Media Use and Mental Health among Young Adults.	Nie stwierdzono, aby korzystanie z mediów społecznościowych pozwalało przewidzieć pogorszenia funkcjonowania psychicznego.

Coyne et al. [3]	Does Time Spent using Social Media Impact Mental Health?: An Eight Year Longitudinal Study.	Zwiększony czas spędzany w mediach społecznościowych nie był związany ze wzrostem problemów ze zdrowiem psychicznym w toku rozwoju, gdy analizowano go na poziomie jednostki.
EscobarViera et al. [4]	For Better or for Worse? A Systematic Review of the Evidence on Social Media Use and Depression Among Lesbian, Gay, and Bisexual Minorities.	Media społecznościowe zapewniły przestrzeń do przybliżenia doświadczeń związanych z przynależnością do mniejszości oraz dzielenia się sposobami radzenia sobie z trudnościami i uzyskiwania wsparcia, natomiast wciąż monitorowanie własnego profilu w mediach społecznościowych może stać się źródłem stresu, potencjalnie może prowadzić również do depresji.
Twenge and Martin [12]	Gender Differences in Associations between Digital Media Use and Psychological Well-Being: Evidence from Three Large Datasets.	Stwierdzono, że kobiety były bardziej uzależnione od mediów społecznościowych niż mężczyźni.
Fardouly et al. [5]	The Use of Social Media by Australian Preadolescents and its Links with Mental Health.	Użytkownicy YouTube, Instagrama i Snapchata zgłaszali większe obawy dotyczące postrzegania własnego ciała oraz częstsze zaburzenia związane z odżywianiem niż osoby niekorzystające z tych platform, jednak nie różnili się pod względem objawów depresyjnych ani lęku społecznego.
Wartberg et al. [13]	Internet Gaming Disorder and Problematic Social Media Use in a Representative Sample of German Adolescents: Prevalence Estimates, Comorbid Depressive Symptoms, and Related Psychosocial Aspects.	Analizy dwuwymiarowej regresji logistycznej wykazały, że większe nasilenie objawów depresyjnych, niższy poziom zaufania interpersonalnego oraz gorsze funkcjonowanie rodziny były statystycznie istotnie związane zarówno z zaburzeniem związanym z graniem w gry internetowe, jak i nadmiernym korzystaniem z mediów społecznościowych.

Neira and Barber [10]	Social Networking Site Use: Linked to Adolescents' Social Self-Concept, Self-Esteem, and Depressed Mood.	Większe zaangażowanie w media społecznościowe (aktywne korzystanie z nich) pozwalało przewidzieć występowanie objawów depresyjnych u nastolatków.
-----------------------	--	---

5. Analiza

Niniejsza praca miała na celu systematyczną analizę istniejącej literatury dotyczącej wpływu korzystania z mediów społecznościowych na zdrowie psychiczne. Choć wyniki badań nie były całkowicie spójne, analiza wykazała jednak związek między korzystaniem z mediów społecznościowych a problemami ze zdrowiem psychicznym. Mimo że istnieją dowody potwierdzające związek między mediami społecznościowymi a zdrowiem psychicznym, zgłaszano również przeciwnie wnioski. Na przykład, jedno z poprzednich badań nie wykazało związku między czasem spędzonym w mediach społecznościowych a depresją, ani między działaniami związanymi z mediami społecznościowymi a depresją [Marwick i Boyd, 2014, s. 1051-1067]. Podobnie Neira i Barber odkryli, że podczas gdy większe zaangażowanie w media społecznościowe (aktywne korzystanie z mediów społecznościowych) prognozowało u nastolatków objawy depresyjne, nie znaleziono związku między częstotliwością korzystania z mediów społecznościowych a ich obniżonym nastrojem [Neira i Barber, 2014, s. 56-64].

Dzisiaj, w dobie Internetu, informacje są rozprzestrzeniane w imponującym tempie. Laptop, telewizor, tablet i telefon są w ciągłym użytku, bombardując nas najróżniejszymi informacjami ze świata. Wchodząc do sklepu odzieżowego, nasz wzrok wędruje w stronę modnych ubrań, niezależnie od tego, czy wpisują się one w nasze preferencje. Ilość danych, jaka płynie z ekranów urządzeń elektronicznych potrafi być bardzo przytłaczająca, a tempo w jakim ich treść jest zmieniana, sprawia, że aby być z nimi na bieżąco, musimy poświęcić znaczną część swojego czasu. Chęć nadążenia za aktualnymi trendami sprawia, że osoby podatne na wpływ nie mają czasu choć przez chwilę zastanowić się, czy podejmowana decyzja jest wynikiem indywidualnej refleksji czy zaledwie impulsem ze strony mediów społecznościowych.

Niektórzy nastolatki doświadczać lęku wynikającego z mediów społecznościowych związanego ze strachem przed stratą (FOMO – FEAR OF MISSING OUT), co zmusza ich do regularnego odpowiadania i sprawdzania wiadomości oraz powiadomień od wszystkich swoich znajomych. Depresja jest jednym z niezamierzonych skutków niepotrzebnego korzystania z mediów społecznościowych. Szczegółowo rzecz ujmując, depresja nie ogranicza się tylko do Facebooka, ale dotyczy również innych portali społecznościowych, co powoduje problemy psychologiczne. Nowe badanie wykazało, że osoby zaangażowane w media społecznościowe, gry, SMS-y, telefony komórkowe itp. są bardziej narażone na doświadczanie depresji. Poprzednie badanie wykazało 70-procentowy wzrost samodzielnie zgłaszanych objawów depresyjnych w grupie korzystającej z mediów społecznościowych. Innym wpływem mediów społecznościowych, który powoduje depresję, jest związany z intymnością/zabawą [Escobar-Viera i in., 2018].

Inne badanie oceniało różnice płciowe w związkach między korzystaniem z mediów społecznościowych a zdrowiem psychicznym. Okazało się, że kobiety były bardziej uzależnione od mediów społecznościowych w porównaniu do mężczyzn [Twenge i in., 2020, s. 91-102].

6. Ograniczenia

Niniejszy przegląd systematyczny posiada swoje ograniczenia. Liczba zakwalifikowanych badań jest stosunkowo niewielka, co może ograniczać możliwości odpowiedniej analizy uzyskanych wyników. Dodatkowo analizowane badania różniły się pod względem metodologii, grup badawczych, a także sposobów pomiaru aktywnego korzystania z mediów społecznościowych i stanu zdrowia psychicznego, dlatego należy brać pod uwagę niepewności pomiarowe z tym związane. Badania na podstawie obserwacji nie pozwalają na jednoznaczne określenie związku pomiędzy mediami społecznościowymi a stanem zdrowia społeczeństwa, natomiast mogą być dobrym fundamentem wniosków na ten temat. Ponadto badania opierają się na samoocenie uczestników, co mogło prowadzić do błędów wynikających z subiektywnego postrzegania rzeczywistości. Należy kontynuować badania na ten temat, uwzględniając bardziej zróżnicowane grupy, a także lepiej rozwiniętą metodologię. Wskazane jest opracowanie i wdrożenie programów edukacyjnych, zwiększających samoświadomość społeczeństwa.

7. Wnioski

Media społecznościowe to nowy obszar badań, który szybko rośnie i zyskuje popularność. Tym samym wiąże się z nimi wiele niezbadanych i nieoczekiwanych konstruktywnych aspektów. Ostatnio badania wykazały, że korzystanie z platform mediów społecznościowych może mieć szkodliwy wpływ na zdrowie psychologiczne ich użytkowników. Jednak stopień, w jakim media społecznościowe wpływają na opinię publiczną, nie został jeszcze określony. Ten przegląd systematyczny wykazał, że zazdrość w mediach społecznościowych może wpływać na poziom lęku i depresji u jednostek. Akceptacja ze strony społeczeństwa to naturalne pragnienie, które niestety często wymaga dopasowania się stricte pod ustalone normy, a niespełnienie ich często skutkuje wykluczeniem z grupy. Dodatkowo, informacje uzyskane z tego badania mogą być pomocne nie tylko dla specjalistów medycznych, ale także dla badań w dziedzinie nauk społecznych – wyniki tego badania sugerują, że potencjalne przyczyny sprawcze, wynikające z mediów społecznościowych można wziąć pod uwagę podczas współpracy z pacjentami, u których zdiagnozowano lęki lub depresję. Dalsze badania w tej dziedzinie mogą przysłużyć się do polepszenia wskaźników lęku i depresji, a także do lepszej jakości życia społeczeństwa.

Bibliografia:

1. Bartosik-Purgat M, Filimon N, Kiygi-Calli M. *Social media and higher education: An international perspective*. Economics & Sociology. 2017;10:181–191.
2. Berryman C, Ferguson C, Negy C. *Social media use and mental health among young adults*. Psychiatric Quarterly. 2018;89:307–314.

3. Coyne SM, Rogers AA, Zurcher JD, Stockdale L, Booth M. *Does time spent using social media impact mental health? An eight year longitudinal study*. Computers in Human Behavior. 2020;104:106160.
4. Escobar-Viera C, Whitfield D, Wessel C, et al. *For better or for worse? A systematic review of the evidence on social media use and depression among lesbian, gay, and bisexual minorities*. JMIR Mental Health. 2018;5:e10496.
5. Fardouly J, Magson NR, Rapee RM, et al. *The use of social media by Australian preadolescents and its links with mental health*. Journal of Clinical Psychology. 2020;31:1–23.
6. Iannotti RJ, Janssen I, Haug E, et al. *Interrelationships of adolescent physical activity, screen-based sedentary behavior, and social and psychological health*. International Journal of Public Health. 2009;54:191–198.
7. Marwick AE, Boyd D. *Networked privacy: How teenagers negotiate context in social media*. New Media & Society. 2014;16:1051–1067.
8. Martinsen EW. *Physical activity in the prevention and treatment of anxiety and depression*. Nordic Journal of Psychiatry. 2008;62:25–29.
9. Mohamad M, Juahir H, Ali NAM, Kamarudin MKA, Karim F, Badarilah N. *Developing health status index using factor analysis*. Journal of Fundamental and Applied Sciences. 2017;9:83–92.
10. Neira CJB, Barber BL. *Social networking site use: Linked to adolescents' social self-concept, self-esteem, and depressed mood*. Australian Journal of Psychology. 2014;66:56–64.
11. Rahman NI, Ismail S, Seman TNAT, et al. *Stress among preclinical medical students of University Sultan Zainal Abidin*. Journal of Applied Pharmaceutical Science. 2013;3: 76–81.
12. Twenge J, Martin G. *Gender differences in associations between digital media use and psychological well-being: Evidence from three large datasets*. Journal of Adolescence. 2020;79:91–102.
13. Wartberg L, Kriston L, Thomasius R. *Internet gaming disorder and problematic social media use in a representative sample of German adolescents: Prevalence estimates, comorbid depressive symptoms, and related psychosocial aspects*. Computers in Human Behavior. 2020;103:31–36.
14. World Health Organization. *The World Health Report 2004: Changing History*. Geneva: World Health Organization; 2004. Dostęp: 04.06.2026.

5. TRANSFERRING FANTASY INTO REAL LIFE: ON QUIDDITCH AND QUADBALL

Patryk Kapa

University of Łódź

Pomorska 171/173, 90-236 Łódź

E-mail: patryk.kapa15@gmail.com

1. Introduction

When I think of a game featuring characters from a fantasy universe, the first thing that comes to my mind is Gwint. In its original conception, it was meant to be a mini-game - a kind of "break" for players used to controlling Geralt, or sometimes Ciri, in *The Witcher 3*. Gwint proved so popular with fans that CD Projekt Red decided to release an entire standalone production devoted to it. In this case, however, the game never crossed the barrier into the real world. One would search in vain for cafés, or even card-game tournaments, that in reality bring together players competing for a champion's trophy.

This barrier - between the fantastical world and the real world - was broken by another fantasy game: quidditch, from the world of Harry Potter, which in "our" real world became quadball.

How, then, did it happen that people can play a game invented for wizards, and what exactly do they play it for? I will try to understand this from the perspective of a fan steeped in the most popular sport of all - football.

2. The History of Quidditch

Quidditch is a sport invented by J.K. Rowling and played by wizards in the Harry Potter universe. It was a brutal team game whose rules were developed on the basis of "human" sports such as cricket, football, baseball and rugby. Its origins date back to the 11th century in the history of the Harry Potter world [Harry Potter Wiki, 2026]. A separate book was devoted to quidditch, titled *Quidditch Through the Ages*, published in 2001. It was written by J.K. Rowling under the pen name Kennilworthy Whisp. The project was created for charitable purposes. The book describes the history of the game, its rules, and the equipment used by wizards. The rules are based on a contest between two teams of seven players each. The goal of each team is to score more points than the opponent by the end of the match, or to catch the so-called "golden snitch" - an elusive, enchanted device.

The sport known from the Harry Potter universe functioned for years solely as an element of the wizarding world. Everything changed in 2005, when a group of students at Middlebury College in Vermont decided to bring the game into reality. They were looking for an alternative to classic sports. They reached for an element of popular culture that was close and familiar to them. Initially, quadball had the character of a pastime. It was a form of integration and spending time together. Over time, however, the game began to change. The greatest difficulty seems to have been transferring the fantastical elements into the real world.

In the Harry Potter universe, players moved around on broomsticks, hit balls that magically returned to the striker, and chased a flying, enchanted "snitch." Ultimately, it was decided to retain many elements from the wizarding world. Enchanted broomsticks were replaced with PVC pipes, which players are required to place between their legs and run with. The "snitch" was replaced by a yellow ball attached to the belt of a chosen, neutral person, whose job is to run away from the players of both teams - something that sounds comical to fans of traditional disciplines.

Quadball, however, gradually took on the features of a fully-fledged sporting discipline. It became a contact sport and a co-educational one. At the same time, it began to require genuine physical fitness, speed and tactical thinking. As a result, the game is dynamic and intense. The fantastical aesthetic therefore does not exclude physical effort, but it does give quadball a playful character, free of the cult of discipline present in other sports.

As the game developed, the need arose for organization and standardization of the rules. To this end, the International Quidditch Association was established in 2010. The organization oversees the development of the discipline worldwide and coordinates tournaments and the activities of hundreds of teams. Thanks to this, quadball has traveled the path from a fan curiosity to a formalized sport of international reach. This process shows that an important element from the world of fantasy can become a real practice. Here, imagination truly shapes reality.

3. Quadball as an Alternative Sport

Quadball can be viewed as an alternative sport. It does not function within the mainstream of sporting competition, but rather constitutes a response to its limitations. For many people it is an alternative to traditional disciplines. It also attracts a specific group of participants, often people who previously trained in other sports and, for various reasons, gave them up. For some, they were too monotonous; for others, full of formal bureaucratic processes or hierarchy. It also happens that there was no room in them for individuality and freedom [Cohen, 2013, p. 3]. For instance, in the world's most popular sport - football - a phenomenon occurs whereby even amateur players organized in local leagues "play" in imitation of professional players: they take up specific positions and apply tactical elements observed on TV that are effective. Even though matches played at the local level are, in principle, meant to promote the sport and provide good fun rather than focus on the result, any behavior that deviates from footballing norms seen on professional pitches is nonetheless stigmatized both by fans and by teammates.

Quadball offers something different. It does not require sporting perfection or prior success. What matters more is commitment and willingness to participate. As a result, the sport becomes accessible to people who previously did not find their place within the classic model of competition. At this level, however, it does not differ from any sport with a small fan base - small in the sense of insufficient to support professional athletes who can make a living purely from playing. If there is no money in it, spectators have to be attracted by something else, such as an offer of good fun, opportunities for self-fulfillment, and meeting open, interesting people.

Research on the quadball community reveals an interesting picture of players' identity. Players often describe themselves in ways that diverge from the stereotypical image of an

athlete. The terms that appear most frequently are "nerdy," "quirky" or "intelligent" [Cohen, 2013, p. 18]. These are traits that are consciously accepted and emphasized; they become an element of the group's shared identification. Such a subculture does not arise by accident - it is deliberately fostered by the International Quidditch Association. The organization bases the development of the discipline on three pillars: creativity, community, and competition, referred to as the "Three C's" [IQA, 2026].

Thanks to this, quadball creates an inclusive and safe space, which is additionally planned by the federation. The divisions known from other sporting environments are blurred. What matters is not belonging to a particular group, nor is there any internal division into "us" and "them." What matters more is a shared passion and a shared system of values.

4. Inclusivity and Equality in Quadball

This sport stands out from other sporting disciplines through its approach to equality. From the very beginning, it has been strongly oriented toward inclusivity, above all with regard to gender. One of the most important rules of quadball is mandatory co-education, implemented through the so-called "gender ratio" rule. This means that at every moment of the match there must be a specific number of players of different genders on the pitch - that is, out of seven players on a team, a maximum of four may be of the same gender. This rule applies to all participants in the competition. This solution makes quadball significantly different from other contact sports, in which physical condition is particularly decisive. Other traditional sports are also not indifferent to the division by gender: biological women have considerably weaker bodies than biological men, which affects results. If all athletes, male and female, were placed on equal footing, biological women would have no chance of winning, which would be tied to a loss of sponsor funding, among other things. Athletics has for over a decade grappled with the problem of athletes who were biologically born female but whose bodies naturally produce far more testosterone than other representatives of their sex, which in turn affects strength and physical performance. The face of exclusion from traditional sport became, among others, Caster Semenya - a runner from South Africa. Initially, the International Association of Athletics Federations allowed the athlete to compete, but only after she adopted measures to lower the testosterone level in her body; at one point, the runner was banned from competing altogether. Quadball has no such problem, and compared to traditional sports it is very progressive.

Within the structures of the International Quidditch Association, a special initiative called "Title 9 3/4" was even established [US Quidditch, 2026]. The name is a play on words: it refers simultaneously to the American equality act, Title IX, and to Platform 9¾ from the world of Harry Potter. The aim of this initiative is to support women and non-binary people in sport. An important element is also the fight for social justice - people of varying levels of fitness can compete together without fear of exclusion. In this way, quadball ceases to be merely a form of physical activity; it becomes a tool of social change, promoting new models of cooperation, equality and community. Fantasy once again proves to be the starting point for real actions and attitudes.

5. Quadball as a Vehicle for Skill Development

Quadball develops not only physical fitness but also has a major impact on the development of professional and leadership competencies. This results from its grassroots character - it is a sport created by the participants themselves. Unlike traditional disciplines, quadball has no developed infrastructure and lacks steady institutional support. Most teams must be built from scratch, often with minimal support from universities or local institutions. Participants also learn to make decisions: they manage the team's budget and coordinate the team's activities [Cohen, 2013, p. 32]. They must, in a sense, take care of favorable playing conditions themselves - something not encountered in popular sports, where players do not need to worry about the availability of training venues, transport, or any kind of logistics, and can focus solely on the game. Such a situation can sometimes work against a player's development. This problem is particularly visible in the football academies of large clubs, where usually only some of the young players will become professional footballers. At a certain point (most often when they reach the age of 19–21), they are removed from the world of the academy, where for several years they had free, laundered clothing and appropriate meals provided. When players from academies find themselves in the real world, they often initially cannot cope with reality - they must perform ordinary tasks that were previously done for them by academy staff. In the case of quadball, such situations could not arise: there, due to poor organizational conditions, players are, in a sense, hardened and better prepared to deal with life's difficulties.

6. Conclusion

In summary, for fans of popular sports, quadball may seem like a less-than-serious discipline. I admit that I myself initially judged it that way - mainly because of the appearance of people running around with broomsticks between their legs. In reality, however, this sport, borrowed from the world of Harry Potter, responds to many of the problems that traditional sport struggles with. Quadball does not have excessive hierarchy or formalization; it still retains many elements of good fun rather than tactical games. In addition, it makes room for representatives of different genders and for non-binary people. Especially in the case of the latter, traditional sport still cannot cope with resolving the problem of their participation in professional competition. Beyond providing fun, quadball, through its limited popularity and scant institutional support, develops additional organizational skills in its athletes. Finally, this sport is a special case in which an invented discipline from a fantastical, magical world was transferred into reality and did not become a short-lived fad.

Bibliography:

1. Cohen, A. (2013). The Impacts and Benefits Yielded from the Sport of Quidditch (Doctoral dissertation). Texas A&M University. <https://oaktrust.library.tamu.edu/items/ce521df0-5afc-4fa5-b396-31d800b46de9> (accessed: 21.01.2026).

List of Websites

2. About the IQA, <https://iqaquidditch.com/about/mission> (accessed: 22.01.2026).
3. Quidditch, <https://harrypotter.fandom.com/pl/wiki/Quidditch> (accessed: 21.01.2026).
4. TITLE 9 3/4, <https://www.usquadball.org/about/title-9-34> (accessed: 22.01.2026).

6. MECHANIZMY TRANSFORMACJI OSOBISTEJ W TURYSTYCE TRANSFORMACYJNEJ: PRZEGLĄD WSPÓŁCZESNYCH BADAŃ NA PRZYKŁADZIE CAMINO PORTUGUÉS

mgr Karolina Kocoł

badaczka niezależna

E-mail: kocoł.karolina@gmail.com

1. Wstęp

Współczesne przemiany społeczne, postępująca cyfryzacja oraz przyspieszające tempo życia sprawiają, że zagadnienia zdrowia psychicznego i dobrostanu stają się jednym z najważniejszych obszarów zainteresowania nauk o zdrowiu i nauk społecznych. W odpowiedzi na rosnącą liczbę osób doświadczających przewlekłego stresu, wypalenia zawodowego czy kryzysów tożsamości coraz większą uwagę poświęca się również działaniom wspierającym rozwój osobisty, odporność psychiczną oraz dobrostan [World Health Organization, 2020; World Health Organization, 2022].

Jednym z dynamicznie rozwijających się kierunków badań jest turystyka transformacyjna (*transformative tourism*), rozumiana jako forma podróżowania prowadząca do zmian w sposobie postrzegania siebie, własnych wartości oraz relacji z otoczeniem [Teoh, Wang i Kwek, 2021; Zhao i Agyeiwaah, 2023]. W odróżnieniu od tradycyjnych ujęć turystyki koncentruje się ona nie na samym przemieszczaniu się czy wypoczynku, lecz na doświadczeniach mogących inicjować proces trwałej transformacji osobistej.

Jednym z najlepiej przebadanych przykładów tego rodzaju doświadczeń pozostaje Camino de Santiago. Współczesne badania wskazują, że pielgrzymka coraz częściej podejmowana jest nie tylko z powodów religijnych, lecz także w celu poprawy dobrostanu psychicznego, poszukiwania sensu życia, rozwoju osobistego czy poradzenia sobie z sytuacją kryzysową [Brumec i Roszak, 2024; Johnmeyer i in., 2025]. Szczególnie interesującym przykładem pozostaje Camino Portugués, które ze względu na swoją specyfikę stanowi wartościowy model analizy mechanizmów transformacji zachodzących podczas długodystansowego marszu.

Pomimo rosnącej liczby publikacji poświęconych turystyce transformacyjnej nadal brakuje opracowań syntetyzujących współczesny stan wiedzy dotyczący mechanizmów odpowiedzialnych za trwałość obserwowanych zmian. Większość badań koncentruje się na efektach doświadczeń transformacyjnych, natomiast znacznie rzadziej podejmuje próbę wyjaśnienia procesów prowadzących do zmiany osobistej [Teoh i in., 2021; Zhao i Agyeiwaah, 2023].

Celem niniejszego artykułu jest krytyczna analiza współczesnych badań dotyczących mechanizmów transformacji osobistej w turystyce transformacyjnej oraz identyfikacja czynników, które literatura wskazuje jako kluczowe dla procesu trwałej zmiany. Analizę przeprowadzono na przykładzie Camino Portugués, stanowiącego jedno z najlepiej udokumentowanych doświadczeń transformacyjnych we współczesnych badaniach nad

turystyką. Artykuł ma charakter przeglądowy i opiera się na krytycznej analizie literatury z zakresu nauk o turystyce, psychologii oraz nauk o zdrowiu.

2. Materiał i metody

Niniejszy artykuł ma charakter przeglądowy i został opracowany z wykorzystaniem metody krytycznej analizy literatury (*critical literature review*), umożliwiającej syntezę aktualnego stanu wiedzy, identyfikację najważniejszych kierunków badań oraz wskazanie istniejących luk badawczych [Snyder, 2019]. Celem przeglądu było uporządkowanie współczesnych badań dotyczących mechanizmów transformacji osobistej opisywanych w kontekście turystyki transformacyjnej oraz Camino de Santiago.

Analizą objęto publikacje z zakresu nauk o turystyce, psychologii, nauk o zdrowiu oraz psychologii środowiskowej. Uwzględniono przede wszystkim artykuły opublikowane w recenzowanych czasopismach naukowych, przeglądy systematyczne, opracowania koncepcyjne oraz raporty Światowej Organizacji Zdrowia (WHO). Dobór literatury miał charakter celowy (*purposive sampling*). Analiza obejmowała głównie publikacje wydane w latach 2020–2026, uzupełnione o klasyczne prace stanowiące podstawę badań nad transformacyjnym uczeniem się, psychologią narracyjną oraz koncepcją liminalności [Mezirow, 1991; McAdams, 2001; Turner, 1969].

W procesie analizy skoncentrowano się na badaniach dotyczących czynników najczęściej wskazywanych jako wspierające transformację osobistą, takich jak aktywność fizyczna, kontakt z naturą, doświadczenie liminalności, refleksyjność, narracyjne konstruowanie tożsamości oraz wspólnotowość (*communitas*). Następnie dokonano krytycznej syntezy wyników badań, identyfikując obszary zgodności pomiędzy autorami oraz najważniejsze kierunki dalszych analiz [Snyder, 2019].

3. Wyniki i dyskusja

3.1. Współczesne ujęcia turystyki transformacyjnej

Turystyka transformacyjna (*transformative tourism*) należy do niezwykle dynamicznie rozwijających się obszarów badań w naukach o turystyce. Współczesne opracowania wskazują, że podróż coraz częściej postrzegana jest nie tylko jako forma wypoczynku lub poznawania nowych miejsc, lecz także jako doświadczenie mogące prowadzić do trwałych zmian w sposobie postrzegania siebie, własnych wartości oraz relacji z otoczeniem [Teoh, Wang i Kwek, 2021; Zhao i Agyeiwaah, 2023]. Tym samym punkt ciężkości przesuwa się z samego aktu podróżowania na proces interpretowania doświadczeń i ich wpływ na funkcjonowanie jednostki.

Koncepcja turystyki transformacyjnej wywodzi się z teorii transformacyjnego uczenia się (*Transformative Learning Theory*) Mezirowa [1991], zgodnie z którą trwała zmiana następuje w wyniku krytycznej refleksji nad dotychczasowymi przekonaniem i sposobem interpretowania rzeczywistości. W badaniach nad turystyką założenia te rozwinęto, wskazując, że doświadczenia podróżnicze mogą inicjować proces prowadzący do przewartościowania celów życiowych, zmiany perspektywy oraz rozwoju osobistego [Pung, Gnoth i Del Chiappa, 2020; Teoh, Wang i Kwek, 2021].

Analiza współczesnej literatury pokazuje jednak, że nie wypracowano dotychczas jednolitej definicji turystyki transformacyjnej ani spójnego modelu wyjaśniającego mechanizmy odpowiedzialne za trwałość obserwowanych zmian. Większość autorów koncentruje się na efektach doświadczeń transformacyjnych, takich jak wzrost samoświadomości, poprawa dobrostanu czy zmiana systemu wartości, natomiast znacznie rzadziej podejmowane są próby wyjaśnienia procesów prowadzących do ich wystąpienia [Teoh i in., 2021; Zhao i Agyeiwaah, 2023].

Jednocześnie coraz częściej podkreśla się potrzebę interdyscyplinarnego podejścia do badań nad turystyką transformacyjną. Współczesne opracowania wskazują, że proces transformacji jest wynikiem współdziałania czynników biologicznych, psychologicznych, społecznych i środowiskowych, dlatego jego analiza wymaga integracji dorobku nauk o turystyce z psychologią, naukami o zdrowiu oraz psychologią środowiskową [Teoh i in., 2021; Zhao i Agyeiwaah, 2023].

Przegląd aktualnych badań prowadzi do wniosku, że turystyka transformacyjna stanowi nie tyle odrębny rodzaj podróżowania, ile sposób doświadczania podróży, w którym kluczowe znaczenie ma potencjał inicjowania trwałej zmiany osobistej. Jednym z najlepiej przebadanych przykładów tego rodzaju doświadczeń pozostaje Camino de Santiago, które w literaturze coraz częściej wykorzystywane jest jako model analizy mechanizmów transformacji osobistej.

3.2. Camino de Santiago jako model doświadczenia transformacyjnego

Camino de Santiago jest jednym z najlepiej przebadanych przykładów turystyki transformacyjnej we współczesnej literaturze. Choć pielgrzymka od wieków pełniła przede wszystkim funkcję religijną, współczesne badania wskazują, że coraz większa grupa uczestników podejmuje ją z powodów niezwiązanych z religią, takich jak potrzeba zmiany, poszukiwanie sensu życia, poprawa dobrostanu psychicznego, rozwój osobisty czy chęć zmierzenia się z sytuacją kryzysową [Brumec i Roszak, 2024; Johnmeyer i in., 2025]. Rosnące zróżnicowanie motywacji uczestników sprawiło, że Camino stało się przedmiotem zainteresowania badaczy reprezentujących nie tylko nauki o religii, ale również psychologię, socjologię oraz nauki o turystyce.

Rosnące zainteresowanie Camino wynika również z jego specyfiki jako doświadczenia łączącego wiele czynników uznawanych za sprzyjające transformacji osobistej. Wielodniowy marsz angażuje uczestników w regularną aktywność fizyczną, zapewnia długotrwały kontakt z przyrodą, ogranicza bodźce charakterystyczne dla codziennego życia oraz stwarza warunki do autorefleksji i budowania relacji z innymi pielgrzymami. Współwystępowanie tych elementów sprawia, że Camino stanowi wartościowy model badania procesów prowadzących do trwałej zmiany [Johnmeyer i in., 2025; Kelly, 2024].

Dotychczasowe badania wskazują, że uczestnicy Camino najczęściej opisują doświadczenia związane ze wzrostem samoświadomości, zmianą hierarchii wartości, poprawą dobrostanu psychicznego oraz większym poczuciem sprawczości i sensu życia [Brumec i Roszak, 2024; Johnmeyer i in., 2025]. Jednocześnie autorzy podkreślają, że transformacja nie jest automatycznym efektem odbycia pielgrzymki, lecz rezultatem złożonego procesu, na który wpływają zarówno indywidualne cechy uczestników, jak i sposób interpretowania własnych doświadczeń [Teoh i in., 2021; Zhao i Agyeiwaah, 2023].

W niniejszym artykule jako przykład doświadczenia transformacyjnego przyjęto Camino Portugués. Szlak ten należy do najpopularniejszych dróg prowadzących do Santiago de Compostela i charakteryzuje się umiarkowanym poziomem trudności, rozwiniętą infrastrukturą oraz zróżnicowanym środowiskiem przyrodniczym, obejmującym zarówno obszary nadmorskie, jak i śródlądowe. Dzięki temu stanowi odpowiedni kontekst do analizy mechanizmów transformacji osobistej opisywanych we współczesnych badaniach.

3.3. Mechanizmy transformacji osobistej

Analiza współczesnej literatury wskazuje, że transformacja osobista zachodząca podczas doświadczeń turystyki transformacyjnej nie jest wynikiem pojedynczego czynnika, lecz efektem współdziałania procesów biologicznych, psychologicznych, społecznych i środowiskowych. Choć poszczególni autorzy akcentują odmienne aspekty tego zjawiska, większość badań wskazuje na pięć powtarzających się mechanizmów: aktywność fizyczną, kontakt z naturą, doświadczenie liminalności, refleksyjność prowadzącą do rekonstrukcji tożsamości oraz wspólnotowość (*communitas*) [Teoh i in., 2021; Zhao i Agyeiwaah, 2023].

3.3.1. Aktywność fizyczna

Regularna aktywność fizyczna uznawana jest za jeden z podstawowych czynników wspierających zdrowie psychiczne i dobrostan. Badania wskazują, że wysiłek o umiarkowanej intensywności przyczynia się do redukcji stresu, poprawy nastroju, wzrostu poczucia sprawczości oraz zwiększenia odporności psychicznej [World Health Organization, 2020; Warburton i Bredin, 2017]. W przypadku Camino znaczenie ma nie tylko sam marsz, lecz jego wielodniowy, rytmiczny charakter, sprzyjający wyciszeniu oraz koncentracji na bieżącym doświadczeniu. Długodystansowa wędrówka staje się tym samym nie tylko formą aktywności fizycznej, ale również elementem wspierającym proces transformacji osobistej [Johnmeyer i in., 2025].

3.3.2. Kontakt z naturą i blue spaces

Coraz więcej badań wskazuje, że środowisko naturalne aktywnie współtworzy doświadczenie transformacyjne. Kontakt z przyrodą sprzyja regeneracji psychicznej, poprawia koncentrację oraz ogranicza negatywne skutki przewlekłego stresu [Chang i in., 2024]. W przypadku Camino szczególne znaczenie ma długotrwałe przebywanie poza środowiskiem miejskim oraz możliwość codziennego kontaktu z krajobrazem. Dodatkowym czynnikiem mogą być tzw. *blue spaces*, czyli środowiska związane z obecnością wody, którym przypisuje się korzystny wpływ na dobrostan psychiczny oraz proces regeneracji [White i in., 2020]. Camino Portugués, prowadzące częściowo wzdłuż wybrzeża Atlantyku, stanowi przykład szlaku, na którym doświadczenie natury i środowiska wodnego może wzmacniać efekty transformacyjne. Wskazuje to, że środowisko naturalne nie stanowi jedynie tła dla doświadczenia podróży, lecz aktywnie współtworzy proces transformacji osobistej.

3.3.3. Liminalność

Jednym z najczęściej opisywanych mechanizmów transformacji jest doświadczenie liminalności, rozumiane jako stan przejściowy pomiędzy dotychczasową a nową tożsamością [Turner, 1969]. W czasie pielgrzymki uczestnicy opuszczają codzienne role społeczne, rutynę

oraz obowiązki, funkcjonując przez pewien czas w odmiennej rzeczywistości. Współczesne badania wskazują, że taki stan sprzyja przewartościowaniu dotychczasowych przekonań, zwiększa otwartość na zmianę oraz ułatwia refleksję nad własnym życiem [Nilsson i Tesfahuney, 2016; Teoh i in., 2021]. Camino stwarza warunki sprzyjające doświadczeniu liminalności dzięki czasowemu oderwaniu od codzienności, prostocie życia oraz rytmowi wielodniowej wędrówki. Najnowsze badania podkreślają ponadto, że pełniejsze zrozumienie procesów transformacji wymaga integrowania koncepcji liminalności z teorią transformacyjnego uczenia się. Takie podejście pozwala wyjaśnić nie tylko przejściowy charakter doświadczenia podróży, lecz również mechanizmy prowadzące do krytycznej refleksji, reinterpretacji wcześniejszych przekonań oraz trwałej zmiany sposobu postrzegania siebie i własnych doświadczeń [Milazzo i Soulard, 2024].

3.3.4. Refleksyjność i rekonstrukcja tożsamości

Transformacja osobista nie wynika wyłącznie z przeżytego doświadczenia, lecz przede wszystkim z jego interpretacji. Zgodnie z koncepcją psychologii narracyjnej człowiek nadaje znaczenie własnemu życiu poprzez tworzenie i reinterpretowanie autobiograficznych opowieści [McAdams, 2001]. Wielodniowy marsz sprzyja autorefleksji oraz krytycznej analizie dotychczasowych doświadczeń, co może prowadzić do zmiany sposobu postrzegania siebie i własnej historii życia [Frank, 2010]. W literaturze podkreśla się, że właśnie proces nadawania znaczenia doświadczeniom odróżnia transformację od krótkotrwałej poprawy samopoczucia [Teoh i in., 2021].

3.3.5. *Communitas* i relacje społeczne

Istotnym elementem doświadczeń transformacyjnych jest również *communitas*, czyli poczucie wspólnoty powstające pomiędzy osobami uczestniczącymi w tym samym doświadczeniu [Turner, 1969]. Badania nad Camino wskazują, że relacje tworzone pomiędzy pielgrzymami sprzyjają wzajemnemu wsparciu, wymianie doświadczeń oraz budowaniu poczucia przynależności [Johnmeyer i in., 2025]. W przeciwieństwie do relacji opartych na codziennych rolach społecznych mają one często charakter bardziej spontaniczny i egalitarny. Wspólne pokonywanie trudności oraz dzielenie się doświadczeniami może wzmacniać proces transformacji, ułatwiając uczestnikom reinterpretację własnych przeżyć i utrwalenie zachodzących zmian.

Tabela 1. Mechanizmy transformacji osobistej identyfikowane we współczesnych badaniach

Mechanizm	Znaczenie w procesie transformacji
Aktywność fizyczna	Redukcja stresu, poprawa dobrostanu psychicznego, wzrost poczucia sprawczości i odporności psychicznej.
Kontakt z naturą i <i>blue spaces</i>	Regeneracja psychiczna, poprawa uważności, ograniczenie przeciążenia poznawczego oraz wzrost dobrostanu.
Liminalność	Czasowe oderwanie od codziennych ról społecznych, otwartość na zmianę oraz przewartościowanie dotychczasowych przekonań.
Refleksyjność i rekonstrukcja tożsamości	Krytyczna refleksja nad własnymi doświadczeniami, reinterpretacja historii życia oraz kształtowanie nowej narracji tożsamościowej.
<i>Communitas</i> i relacje społeczne	Budowanie poczucia wspólnoty, wsparcie społeczne oraz współdzielenie doświadczeń sprzyjających utrwaleniu zmian.

Źródło: opracowanie własne na podstawie cytowanej literatury.

3.4. Ograniczenia badań i kierunki dalszych analiz

Analiza współczesnej literatury wskazuje, że badania nad turystyką transformacyjną rozwijają się dynamicznie, jednak nadal charakteryzują się znaczną niejednorodnością pod względem stosowanych definicji, metod badawczych oraz sposobów oceny efektów transformacji [Teoh i in., 2021; Zhao i Agyeiwaah, 2023]. Większość dostępnych opracowań opiera się na badaniach jakościowych oraz deklaracjach uczestników, co utrudnia ocenę trwałości obserwowanych zmian i porównywanie wyników między poszczególnymi badaniami.

Nadal niewiele wiadomo również o wzajemnym oddziaływaniu poszczególnych mechanizmów transformacji. Dotychczasowe badania najczęściej analizują aktywność fizyczną, kontakt z naturą, liminalność czy wspólnotowość jako odrębne czynniki, rzadziej podejmując próbę wyjaśnienia ich współzależności oraz znaczenia w długoterminowym procesie zmiany [Johnmeyer i in., 2025; Teoh i in., 2021].

W przyszłych badaniach zasadne wydaje się prowadzenie interdyscyplinarnych projektów łączących perspektywę nauk o turystyce, psychologii, nauk o zdrowiu oraz psychologii środowiskowej. Szczególnie wartościowe mogą okazać się badania podłużne (*longitudinal studies*), pozwalające ocenić trwałość transformacji oraz lepiej zrozumieć mechanizmy odpowiedzialne za utrzymywanie się obserwowanych zmian w dłuższej perspektywie czasowej [Zhao i Agyeiwaah, 2023].

4. Wnioski

Przeprowadzony przegląd literatury wskazuje, że turystyka transformacyjna stanowi jeden z najszybciej rozwijających się obszarów badań w naukach o turystyce, koncentrujący się na doświadczeniach prowadzących do trwałych zmian w funkcjonowaniu jednostki. Współczesne opracowania odchodzą od postrzegania podróży wyłącznie jako formy wypoczynku, podkreślając jej potencjał w zakresie wspierania dobrostanu psychicznego,

rozwoju osobistego oraz rekonstrukcji tożsamości [Teoh i in., 2021; Zhao i Agyeiwaah, 2023].

Analiza dostępnych badań pozwala stwierdzić, że transformacja osobista nie jest efektem pojedynczego doświadczenia, lecz rezultatem współdziałania wielu wzajemnie powiązanych mechanizmów. Do najczęściej wskazywanych należą regularna aktywność fizyczna, kontakt z naturą i środowiskiem wodnym (*blue spaces*), doświadczenie liminalności, proces autorefleksji prowadzący do reinterpretacji własnej historii życia oraz relacje społeczne budowane w warunkach *communitas*. Współczesna literatura podkreśla, że dopiero współwystępowanie tych czynników sprzyja powstawaniu trwałych zmian psychologicznych i społecznych.

Przegląd badań potwierdza również, że Camino de Santiago stanowi jeden z najlepiej udokumentowanych modeli doświadczenia transformacyjnego. Szczególnie Camino Portugués tworzy warunki sprzyjające analizie mechanizmów transformacji dzięki połączeniu długodystansowego marszu, kontaktu z przyrodą, prostoty codziennego funkcjonowania oraz możliwości budowania relacji z innymi uczestnikami pielgrzymki.

Jednocześnie analiza literatury wskazuje na potrzebę dalszych badań nad trwałością efektów transformacyjnych oraz wzajemnymi zależnościami pomiędzy poszczególnymi mechanizmami zmiany. Przedstawiony przegląd wskazuje, że turystyka transformacyjna stanowi obiecujący kierunek badań wymagający dalszych analiz empirycznych oraz integracji perspektywy nauk o turystyce, psychologii i nauk o zdrowiu.

Bibliografia:

1. Brumec S., Roszak P. (2024). Exploring the Transformative Aftereffects of Religious Experiences on Pilgrims Along the Camino de Santiago in Spain. *Journal of Religion and Health*, 63(6), s. 4876–4901.
2. Chang L., Moyle B. D., Vada S., Filep S., Dupre K., Liu B. (2024). Re-thinking tourist wellbeing: An integrative model of affiliation with nature and social connections. *International Journal of Tourism Research*, 26(2), e2644.
3. Frank A. W. (2010). *Letting Stories Breathe. A Socio-Narratology*. Chicago: The University of Chicago Press.
4. Johnmeyer C., Xu S., Wilhelm Stanis S., Morgan M. (2025). The Meaningful Elements of the Camino: Toward Understanding Pilgrims' Transformative Experience. *Annals of Tourism Research Empirical Insights*, 6(2), 100201.
5. Kelly C. (2024). Why Blue Spaces and Wellbeing Matter for Tourism and Leisure Businesses. W: H. Konu, M. K. Smith (red.), *A Research Agenda for Tourism and Wellbeing* (s. 137–156). Cheltenham: Edward Elgar.
6. McAdams D. P. (2001). The Psychology of Life Stories. *Review of General Psychology*, 5(2), s. 100–122.
7. Mezirow J. (1991). *Transformative Dimensions of Adult Learning*. San Francisco: Jossey-Bass.
8. Milazzo L., Soulard J. (2024). Bridging Disciplinary Perspectives on Transformation: Epistemologically Evaluating Liminality and Transformative Learning. *Annals of Tourism Research*, 104, 103710.

9. Nilsson M., Tesfahuney M. (2016). Performing the Pilgrimage: Rethinking the Pilgrim Body and Movement on the Camino de Santiago. *Mobilities*, 11(1), s. 149–165.
10. Pung J. M., Gnoth J., Del Chiappa G. (2020). Tourist Transformation: Towards a Conceptual Model. *Current Issues in Tourism*, 23(19), s. 2397–2412.
11. Snyder H. (2019). Literature Review as a Research Methodology: An Overview and Guidelines. *Journal of Business Research*, 104, s. 333–339.
12. Teoh M. W., Wang Y., Kwek A. (2021). Conceptualising Co-Created Transformative Tourism Experiences: A Systematic Narrative Review. *Journal of Hospitality and Tourism Management*, 47, s. 176–189.
13. Turner V. (1969). *The Ritual Process: Structure and Anti-Structure*. Chicago: Aldine Publishing Company.
14. Warburton D. E. R., Bredin S. S. D. (2017). Health Benefits of Physical Activity: A Systematic Review of Current Systematic Reviews. *Current Opinion in Cardiology*, 32(5), s. 541–556.
15. White M., Epston D. (1990). *Narrative Means to Therapeutic Ends*. New York: W. W. Norton & Company.
16. White M. P., Elliott L. R., Gascon M., Roberts B., Fleming L. E. (2020). Blue space, health and well-being: A narrative overview and synthesis of potential benefits. *Environmental Research*, 191, 110169.
17. World Health Organization. (2020). *WHO Guidelines on Physical Activity and Sedentary Behaviour*. Geneva: World Health Organization.
18. World Health Organization. (2022). *World Mental Health Report: Transforming Mental Health for All*. Geneva: World Health Organization.
19. Zhao Y., Agyeiwaah E. (2023). Understanding Tourists' Transformative Experience: A Systematic Literature Review. *Journal of Hospitality and Tourism Management*, 54, s. 188–199.

7. JAK TEORIA INTELIGENCJI WIELORAKICH HOWARDA GARDNERA ZMIENIA PODEJŚCIE DO INDYWIDUALIZACJI NAUCZANIA? PERSPEKTYWA PEDAGOGICZNA I PERSONALISTYCZNA

Marcin Murzyn

Wyższa Szkoła Biznesu – National-Louis University w Nowym Sączu

Wydział Nauk Społecznych i Informatyki

ul. Grunwaldzka 17, 33-300 Nowy Sącz

E-mail: mmurzyn@wsb-nlu.edu.pl

Daria Rejus

Uniwersytet VIZJA w Warszawie

Wydział Nauk o Człowieku

ul. Okopowa 59, 01-043 Warszawa

E-mail: daria.rejus@interia.pl

1. Wstęp

Współczesna edukacja coraz częściej odchodzi od przekonania, że wszyscy uczniowie uczą się w ten sam sposób i osiągają sukces dzięki identycznym metodom nauczania. Rosnąca różnorodność potrzeb edukacyjnych, zainteresowań oraz predyspozycji uczniów sprawia, że jednym z najważniejszych wyzwań szkoły staje się indywidualizacja procesu kształcenia. W centrum uwagi znajduje się już nie tylko przekazywanie wiedzy, lecz także rozpoznawanie potencjału konkretnego ucznia oraz tworzenie warunków umożliwiających jego wszechstronny rozwój.

Istotny wpływ na zmianę sposobu myślenia o edukacji wywarła teoria inteligencji wielorakich Howarda Gardnera. Amerykański psycholog zakwestionował dominujące przez wiele dziesięcioleci przekonanie, że inteligencję można sprowadzić do jednego, mierzalnego wskaźnika. W zamian zaproponował koncepcję zakładającą istnienie wielu względnie niezależnych od siebie rodzajów inteligencji, które tworzą indywidualny profil każdego człowieka. W świetle tej teorii uczniowie różnią się nie tyle poziomem inteligencji, ile sposobem jej przejawiania i wykorzystywania w praktyce.

Koncepcja Gardnera stała się jednym z najczęściej przywoływanych punktów odniesienia w dyskusjach dotyczących personalizacji nauczania, edukacji włączającej oraz wspierania indywidualnych talentów uczniów. Jej znaczenie wykracza jednak poza obszar pedagogiki. Teoria inteligencji wielorakich zwraca uwagę na niepowtarzalność każdej osoby, różnorodność ludzkich zdolności oraz potrzebę odejścia od jednolitych kryteriów oceniania osiągnięć człowieka. W konsekwencji prowadzi do bardziej podmiotowego spojrzenia na ucznia i proces jego rozwoju.

Takie podejście pozostaje zbieżne z podstawowymi założeniami personalizmu chrześcijańskiego. W nurcie tym człowiek postrzegany jest jako osoba posiadająca

niezbywalną godność, indywidualne powołanie oraz własną drogę rozwoju. Wychowanie nie może zatem ograniczać się do przekazywania wiedzy czy przygotowania do pełnienia określonych funkcji społecznych. Jego celem powinno być wspieranie integralnego rozwoju osoby ludzkiej, obejmującego zarówno sferę intelektualną, jak i moralną, społeczną oraz duchową. Z tej perspektywy edukacja staje się procesem odkrywania i rozwijania potencjału wpisanej w konkretną osobę, a nie jedynie realizacją zunifikowanego programu nauczania.

Zarówno teoria inteligencji wielorakich, jak i personalizm chrześcijański podkreślają, że różnice między ludźmi nie powinny być traktowane jako przeszkoda w procesie edukacyjnym, lecz jako wartość wymagająca rozpoznania i odpowiedniego wsparcia. Odejście od modelu „jednej miary dla wszystkich” pozwala dostrzec mocne strony ucznia, wzmacnia jego motywację oraz buduje poczucie własnej wartości. W tym sensie teoria Gardniera może być postrzegana nie tylko jako koncepcja psychologiczna, lecz również jako inspiracja dla bardziej humanistycznego i personalistycznego modelu edukacji.

Celem niniejszego artykułu jest analiza wpływu teorii inteligencji wielorakich Howarda Gardniera na współczesne rozumienie indywidualizacji nauczania. Szczególna uwaga zostanie poświęcona związkom między założeniami tej teorii a personalistyczną wizją człowieka i wychowania. Podjęta analiza ma odpowiedzieć na pytanie, w jakim stopniu koncepcja Gardniera może stanowić teoretyczne i praktyczne uzasadnienie dla budowania szkoły skoncentrowanej na osobie ucznia oraz jego niepowtarzalnym potencjale.

2. Materiały i metody

Artykuł ma charakter teoretyczno-analityczny. Podstawę przeprowadzonych badań stanowi analiza literatury przedmiotu dotyczącej teorii inteligencji wielorakich Howarda Gardniera, zagadnienia indywidualizacji nauczania oraz wybranych koncepcji personalizmu chrześcijańskiego odnoszących się do procesu wychowania i edukacji.

W części poświęconej teorii inteligencji wielorakich wykorzystano przede wszystkim publikacje Howarda Gardniera, w których autor przedstawił założenia swojej koncepcji oraz jej konsekwencje dla praktyki edukacyjnej. Szczególną uwagę zwrócono na opracowania ukazujące rolę różnorodnych zdolności poznawczych człowieka oraz ich znaczenie dla organizacji procesu dydaktycznego. Uzupełniając wykorzystano literaturę pedagogiczną dotyczącą pracy z uczniem zdolnym, indywidualizacji kształcenia oraz współczesnych uwarunkowań rozwoju kompetencji.

Analiza została wzbogacona o wybrane opracowania z zakresu filozofii wychowania i etyki personalistycznej. W tym obszarze punktem odniesienia stały się poglądy przedstawicieli polskiego personalizmu chrześcijańskiego, zwłaszcza Karola Wojtyły, Tadeusza Stycznia oraz Tadeusza Biesagi. Wspólnym elementem tych koncepcji jest przekonanie o niepowtarzalnej wartości osoby ludzkiej oraz konieczności respektowania jej podmiotowości w procesie wychowania.

Odniesienie do myśli filozoficzno-etycznej nie jest tu przypadkowe. Można mieć wrażenie, że Gardner, opracowując swoją koncepcję inteligencji wielorakich, zaproponował coś więcej niż kolejny model wyjaśniający funkcjonowanie ludzkiej psychiki poprzez uogólnienie wyników badań empirycznych. U Gardniera uwidacznia się wszakże głębsza wizja człowieka, jeśli nie o charakterze filozoficznym, to przynajmniej interferująca wyjątkowo ściśle z ustaleniami antropologii filozoficznej i etyki. Oczywiście, dyscypliny

filozoficzne są wieloparadygmatyczne (podobnie zresztą jak pedagogika i psychologia; nie jest to więc zarzut), dlatego zdecydowano się na zestawienie badań Gardniera z konkretnym nurtem filozoficzno-etycznym. Wybór padł na personalizm chrześcijański. Taki zabieg nie jest arbitralny, lecz celowy. I koncepcja inteligencji wielorakich, i myśl personalistyczna są bowiem przejawami afirmacji osoby ludzkiej, przy pełnym poszanowaniu dla jej godności, choć przedsiębranymi innymi ujęciami językowo-metodologicznymi (bo w końcu sytuującymi się w odmiennych dyscyplinach naukowych).

W badaniach zastosowano metodę analizy i krytyki piśmiennictwa, metodę porównawczą oraz metodę hermeneutyczną. Analiza i krytyka piśmiennictwa umożliwiła identyfikację najważniejszych założeń teorii inteligencji wielorakich oraz współczesnych sposobów ich interpretacji. Metoda porównawcza pozwoliła zestawić koncepcję Gardniera z podstawowymi założeniami personalizmu chrześcijańskiego. Z kolei metoda hermeneutyczna została wykorzystana do interpretacji znaczenia indywidualizacji nauczania w świetle personalistycznej wizji człowieka i edukacji.

Przyjęte podejście badawcze pozwoliło odpowiedzieć na pytanie, czy teoria inteligencji wielorakich może stanowić nie tylko narzędzie wspierające skuteczność procesu dydaktycznego, lecz również ważne uzasadnienie dla budowania edukacji respektującej godność, autonomię oraz indywidualny potencjał każdego ucznia. Analiza koncentruje się przede wszystkim na pedagogicznych konsekwencjach teorii Gardniera oraz możliwościach jej wykorzystania we współczesnej praktyce szkolnej.

3. Wyniki

Teoria inteligencji wielorakich została sformułowana przez Howarda Gardniera jako alternatywa wobec tradycyjnego rozumienia inteligencji utożsamianej z pojedynczą zdolnością poznawczą mierzoną za pomocą testów IQ. Gardner zwrócił uwagę, że człowiek może przejawiać wysoki poziom sprawności w różnych obszarach funkcjonowania, które nie zawsze znajdują odzwierciedlenie w wynikach klasycznych badań psychometrycznych. W jego ujęciu inteligencja nie jest jednorodną cechą, lecz zbiorem względnie niezależnych zdolności pozwalających rozwiązywać problemy oraz tworzyć wartości cenione w określonym środowisku kulturowym [Gardner, 2002].

W pierwotnej wersji swojej koncepcji Gardner wyróżnił siedem rodzajów inteligencji, a następnie rozszerzył ich katalog o kolejne formy aktywności poznawczej człowieka. Szczególne znaczenie dla edukacji mają inteligencja językowa, logiczno-matematyczna, przestrzenna, muzyczna, kinestetyczna, interpersonalna oraz intrapersonalna. Każdy człowiek posiada wszystkie wymienione rodzaje inteligencji, jednak ich poziom oraz sposób ujawniania się pozostają indywidualne [Gardner, 2009].

Przyjęcie takiego założenia prowadzi do zasadniczej zmiany sposobu postrzegania ucznia. Tradycyjny model szkoły opierał się w dużej mierze na preferowaniu kompetencji językowych i logiczno-matematycznych. W praktyce oznaczało to, że uczniowie osiągający dobre wyniki w tych obszarach byli częściej postrzegani jako bardziej uzdolnieni. Tymczasem teoria inteligencji wielorakich wskazuje, że sukces edukacyjny może być osiągany również dzięki zdolnościom społecznym, artystycznym, ruchowym czy związanym z samoświadomością. W konsekwencji szkoła powinna tworzyć warunki umożliwiające

rozwój różnych potencjałów ucznia, a nie jedynie tych, które najłatwiej poddają się standaryzowanej ocenie [Gardner, Kornhaber, Wake, 2001].

Z pedagogicznego punktu widzenia szczególnie istotne okazuje się odejście od pytania: „Jak inteligentny jest uczeń?” na rzecz pytania: „W jaki sposób uczeń jest inteligentny?”. Zmiana ta ma znaczenie nie tylko diagnostyczne, ale również wychowawcze. Pozwala bowiem dostrzec mocne strony ucznia, budować jego motywację oraz ograniczać zjawisko etykietowania osób, które nie osiągają wysokich wyników w tradycyjnie ocenianych obszarach edukacji.

W literaturze pedagogicznej podkreśla się, że indywidualizacja nauczania nie oznacza przygotowywania odrębnego programu dla każdego ucznia, lecz tworzenie takich warunków dydaktycznych, które umożliwiają wykorzystanie różnorodnych metod, form pracy oraz sposobów prezentowania treści. W praktyce może to oznaczać równoczesne wykorzystywanie elementów dyskusji, pracy projektowej, aktywności ruchowej, materiałów wizualnych czy działań zespołowych. Dzięki temu uczniowie mogą przyswajać wiedzę zgodnie z dominującymi u nich sposobami poznawania rzeczywistości [Limont, 2012].

Znaczenie teorii Gardniera wykracza jednak poza kwestie organizacji procesu dydaktycznego. Koncepcja ta w istocie prowadzi do bardziej złożonego spojrzenia na człowieka. Odrzuca redukcjonistyczne podejście sprowadzające wartość osoby do wyników osiąganych w wybranych obszarach aktywności oraz podkreśla wielowymiarowość ludzkiego rozwoju. W tym sensie teoria inteligencji wielorakich staje się nie tylko narzędziem pedagogicznym, ale również ważnym punktem odniesienia dla refleksji nad naturą człowieka i celem edukacji.

Szczególnie interesujące wydaje się zestawienie teorii inteligencji wielorakich z nurtem personalistycznym obecnym w filozofii i etyce chrześcijańskiej. Choć Gardner formułował swoją koncepcję na gruncie psychologii poznawczej, a personalizm rozwijał się przede wszystkim w obrębie filozofii człowieka, obydwie podejścia łączy przekonanie o niepowtarzalności każdej osoby oraz sprzeciw wobec redukcjonowania człowieka do jednego tylko aspektu jego funkcjonowania.

W tradycji personalistycznej człowiek ujmowany jest jako byt posiadający własną, niezbywalną godność. Nie jest jedynie elementem większej struktury społecznej ani narzędziem służącym realizacji określonych celów ekonomicznych czy politycznych. Osoba stanowi wartość samą w sobie. Karol Wojtyła podkreślał, że człowieka nie wolno traktować wyłącznie jako środka do celu, ponieważ jego godność wynika z samego faktu bycia osobą [Wojtyła, 1986]. Podobnie Tadeusz Styczeń wskazywał, że podstawowym obowiązkiem moralnym jest afirmacja osoby dla niej samej, niezależnie od jej użyteczności, sprawności czy społecznej pozycji.

Z perspektywy edukacyjnej konsekwencje takiego stanowiska są bardzo istotne. Jeżeli każdy człowiek posiada niepowtarzalną wartość, to proces kształcenia powinien respektować jego indywidualność oraz stwarzać warunki umożliwiające rozwój osobowego potencjału. Edukacja nie może ograniczać się wyłącznie do przekazywania wiedzy i weryfikowania wyników nauczania za pomocą zunifikowanych kryteriów oceny. Jej zadaniem staje się wspieranie integralnego rozwoju osoby obejmującego sferę intelektualną, społeczną, emocjonalną, moralną i duchową.

W tym miejscu dostrzegalna staje się zbieżność między teorią inteligencji wielorakich a założeniami pedagogiki personalistycznej. Gardner wskazuje, że uczniowie różnią się sposobami poznawania świata, tempem uczenia się oraz dominującymi zdolnościami. Personalizm natomiast przypomina, że różnice te nie stanowią przeszkody w procesie wychowania, lecz są naturalnym przejawem bogactwa ludzkiej osoby. W konsekwencji nauczyciel powinien postrzegać ucznia nie przez pryzmat braków czy deficytów, ale przede wszystkim przez pryzmat jego możliwości rozwojowych.

Tadeusz Biesaga, rozwijając personalistyczne rozumienie osoby, zwraca uwagę, że człowiek jest bytem rozumnym, wolnym i zdolnym do odpowiedzialnego działania. Właśnie te właściwości czynią go podmiotem życia moralnego i wychowania. Edukacja nie może więc polegać wyłącznie na dostarczaniu informacji, lecz powinna pomagać człowiekowi w odkrywaniu prawdy o sobie samym oraz rozwijaniu własnych możliwości w relacji do innych osób [Biesaga, 2012]. Tak rozumiane wychowanie zakłada indywidualne podejście do ucznia i odrzuca wszelkie próby sprowadzania go do wyników testów, rankingów czy statystyk edukacyjnych.

Z punktu widzenia praktyki szkolnej oznacza to konieczność odejścia od modelu, w którym wszyscy uczniowie uczą się w identyczny sposób i są oceniani wyłącznie według tych samych kryteriów. Indywidualizacja nauczania nie oznacza przy tym rezygnacji z wymagań edukacyjnych. Oznacza raczej poszukiwanie takich metod pracy, które pozwolą każdemu uczniowi osiągać cele kształcenia przy wykorzystaniu jego mocnych stron. Uczeń posiadający rozwiniętą inteligencję interpersonalną może efektywnie uczyć się podczas pracy zespołowej, natomiast uczeń o dominującej inteligencji przestrzennej może osiągać lepsze rezultaty dzięki wykorzystaniu schematów, map pojęciowych czy materiałów wizualnych.

W tym sensie teoria Gardniera dostarcza praktycznych narzędzi realizacji ideału edukacji personalistycznej. Pozwala bowiem przełożyć ogólne założenie o niepowtarzalności osoby na konkretne rozwiązania dydaktyczne stosowane w codziennej pracy nauczyciela. Dzięki temu indywidualizacja nauczania przestaje być jedynie postulatem pedagogicznym, a staje się rzeczywistą strategią organizowania procesu kształcenia.

Warto jednocześnie zauważyć, że teoria inteligencji wielorakich nie jest jedynie propozycją nowej klasyfikacji ludzkich zdolności. Jej znaczenie polega przede wszystkim na zmianie perspektywy patrzenia na proces edukacyjny. W tradycyjnym modelu szkoły punkt ciężkości spoczywał głównie na przekazywaniu określonego zasobu wiedzy oraz sprawdzaniu stopnia jego opanowania. Uczeń funkcjonował w dużej mierze jako odbiorca treści przygotowanych według jednolitego programu, natomiast różnice indywidualne traktowano często jako przeszkodę utrudniającą realizację celów dydaktycznych. Koncepcja Gardniera prowadzi do odwrócenia tej logiki. Punktem wyjścia staje się nie program, lecz osoba ucznia i jej specyficzny sposób poznawania rzeczywistości.

W praktyce pedagogicznej oznacza to konieczność większej elastyczności w doborze metod nauczania. Nie chodzi przy tym o całkowite odrzucenie tradycyjnych form pracy, lecz o ich uzupełnienie rozwiązaniami umożliwiającymi aktywizowanie różnych potencjałów uczniów. Współczesna dydaktyka coraz częściej wykorzystuje metody projektowe, pracę zespołową, elementy edukacji eksperymentalnej, działania artystyczne czy techniki wizualizacji wiedzy. Wiele z tych rozwiązań można interpretować jako praktyczną realizację

założeń wynikających z teorii inteligencji wielorakich, nawet jeśli nie są one bezpośrednio z nią utożsamiane.

Istotnym następstwem koncepcji Gardnera jest także zmiana podejścia do oceniania osiągnięć szkolnych. Jeżeli przyjmuje się, że człowiek dysponuje różnorodnymi formami inteligencji, wówczas trudno uznać pojedynczy wynik testu za pełny obraz jego możliwości. Nie oznacza to oczywiście rezygnacji z oceniania, lecz potrzebę bardziej zróżnicowanych sposobów diagnozowania postępów ucznia. W literaturze pedagogicznej zwraca się uwagę, że ocenianie powinno nie tylko klasyfikować, ale również wspierać rozwój oraz motywować do dalszej pracy. Teoria inteligencji wielorakich stanowi dodatkowy argument przemawiający za tak rozumianą funkcją oceny.

Z perspektywy personalistycznej szczególnego znaczenia nabiera jeszcze jeden aspekt. Wychowanie nie może sprowadzać się do rozwijania wybranych sprawności intelektualnych przy jednoczesnym pomijaniu innych wymiarów człowieczeństwa. Osoba rozwija się integralnie, a zatem edukacja powinna uwzględniać zarówno sferę poznawczą, jak i społeczną, emocjonalną oraz moralną [Gacka, 2014]. W tym kontekście teoria Gardnera może być odczytywana jako próba przezwyciężenia redukcjonistycznego obrazu człowieka, który przez długi czas dominował w niektórych nurtach psychologii i pedagogiki. Podkreślenie różnorodności ludzkich zdolności prowadzi bowiem do uznania bogactwa osoby oraz jej niepowtarzalnego potencjału rozwojowego.

Nie oznacza to jednak, że teoria inteligencji wielorakich pozostaje wolna od krytyki. Część badaczy zwraca uwagę na trudności związane z empiryczną weryfikacją poszczególnych rodzajów inteligencji oraz na nieostrość granic między nimi. Wskazuje się również, że nie wszystkie elementy teorii znajdują jednoznaczne potwierdzenie w badaniach psychologicznych. Niezależnie od tych zastrzeżeń trudno jednak kwestionować jej wpływ na współczesne myślenie o edukacji. Nawet krytycy Gardnera przyznają, że jego koncepcja przyczyniła się do większego zainteresowania indywidualnymi różnicami między uczniami oraz do poszukiwania bardziej zróżnicowanych metod pracy dydaktycznej.

Można zatem stwierdzić, że najważniejszym osiągnięciem teorii inteligencji wielorakich nie było stworzenie kolejnej typologii zdolności człowieka, lecz zwrócenie uwagi na potrzebę bardziej podmiotowego traktowania ucznia. W tym sensie jej znaczenie wykracza poza psychologię poznawczą i wpisuje się w szerszą refleksję nad celem edukacji. Jeżeli szkoła ma rzeczywiście służyć rozwojowi osoby, musi uwzględniać różnorodność dróg prowadzących do poznania, samorealizacji i odpowiedzialnego uczestnictwa w życiu społecznym. Właśnie dlatego teoria Gardnera pozostaje aktualnym punktem odniesienia w dyskusjach dotyczących indywidualizacji nauczania oraz humanistycznego wymiaru współczesnej edukacji.

4. Podsumowanie

Przeprowadzona analiza pozwala stwierdzić, że teoria inteligencji wielorakich Howarda Gardnera odegrała istotną rolę w zmianie sposobu myślenia o procesie nauczania i uczenia się. Jej znaczenie nie ogranicza się wyłącznie do psychologicznego opisu ludzkich zdolności. W praktyce edukacyjnej koncepcja ta przyczyniła się do upowszechnienia przekonania, że uczniowie różnią się nie tylko poziomem osiągnięć szkolnych, lecz także sposobami poznawania rzeczywistości, przetwarzania informacji oraz rozwijania własnego

potencjału. W konsekwencji coraz większego znaczenia nabiera indywidualizacja nauczania, rozumiana jako dostosowanie metod, form i środków dydaktycznych do potrzeb konkretnego ucznia.

Analiza literatury wskazuje, że teoria Gardnera stworzyła ważne uzasadnienie dla odejścia od jednolitego modelu edukacji, w którym sukces szkolny był utożsamiany przede wszystkim z osiągnięciami w obszarze zdolności językowych i logiczno-matematycznych. Zwrócenie uwagi na wielowymiarowość ludzkich uzdolnień pozwoliło dostrzec potencjał osób, które wcześniej mogły pozostawać niedocenione przez tradycyjny system kształcenia. Tym samym teoria inteligencji wielorakich przyczyniła się do bardziej podmiotowego spojrzenia na ucznia i jego rozwój.

Jednocześnie należy zauważyć, że pełne uzasadnienie takiego podejścia wymaga wyjścia poza perspektywę czysto psychologiczną. Człowiek nie jest bowiem jedynie zespołem funkcji poznawczych, wyników testów czy mierzalnych kompetencji. Choć badania empiryczne dostarczają cennych informacji na temat mechanizmów uczenia się, nie są w stanie wyczerpująco opisać całej rzeczywistości osoby ludzkiej. Właśnie dlatego refleksja pedagogiczna potrzebuje również odniesienia do filozofii człowieka, która pozwala uchwycić głębszy sens wychowania oraz rozwoju osobowego.

W tym kontekście szczególnie wartościowa okazuje się perspektywa personalizmu chrześcijańskiego. Podkreśla ona, że każdy człowiek jest osobą posiadającą niezbywalną godność, niepowtarzalną tożsamość oraz własny potencjał rozwojowy. Edukacja nie może więc ograniczać się do przekazywania wiedzy czy rozwijania określonych sprawności intelektualnych. Jej zadaniem jest wspieranie integralnego rozwoju osoby, obejmującego zarówno sferę poznawczą, jak i moralną, społeczną oraz duchową. Tak rozumiane wychowanie wymaga indywidualnego podejścia do ucznia i respektowania jego podmiotowości.

Z tej perspektywy teoria inteligencji wielorakich i personalizm chrześcijański okazują się wzajemnie komplementarne. Gardner pokazuje różnorodność ludzkich zdolności i wskazuje na konieczność dostrzegania indywidualnych predyspozycji ucznia. Personalizm dostarcza natomiast głębszego uzasadnienia filozoficznego, wyjaśniając, dlaczego różnorodność ta zasługuje na szacunek i dlaczego rozwój każdego człowieka powinien być traktowany jako wartość sama w sobie. Można zatem uznać, że personalistyczna wizja człowieka stanowi ważny argument wzmacniający pedagogiczne intuicje obecne w teorii Gardnera.

W świetle przeprowadzonych analiz należy stwierdzić, że indywidualizacja nauczania nie jest jedynie rozwiązaniem organizacyjnym służącym poprawie efektywności kształcenia. Stanowi ona przede wszystkim konsekwencję określonej wizji człowieka, zgodnie z którą każdy uczeń jest osobą niepowtarzalną i posiadającą własną drogę rozwoju. Teoria inteligencji wielorakich Howarda Gardnera pozostaje jednym z najbardziej wpływowych narzędzi wspierających realizację tej idei we współczesnej edukacji, natomiast personalizm chrześcijański dostarcza jej trwałego i spójnego uzasadnienia antropologicznego.

Bibliografia:

1. Biesaga T. (2012). Osoba a normy etyczne. W: P.S. Mazur (red.), Spór o osobę w świetle klasycznej koncepcji człowieka (s. 113–121). Kraków: Akademia Ignatianum w Krakowie, Wydawnictwo WAM.
2. Gacka B. (2014). Personalizm chrześcijański św. Jana Pawła II. *Studia Theologica Varsaviensia*, 52(1), s. 29–58.
3. Gardner H. (2009). Inteligencje wielorakie. Nowe horyzonty w teorii i praktyce. Warszawa: Wydawnictwo Laurum.
4. Gardner H. (2002). Inteligencje wielorakie. Teoria w praktyce. Poznań: Media Rodzina.
5. Gardner H., Kornhaber M.L., Wake W.K. (2001). Inteligencja. Wielorakie perspektywy. Warszawa: Wydawnictwa Szkolne i Pedagogiczne.
6. Limont W. (2012). Uczeń zdolny. Jak go rozpoznać i jak z nim pracować. Gdańsk: Gdańskie Wydawnictwo Psychologiczne.

8. KOMPETENCJE PRZYSZŁOŚCI W GOSPODARCE CYFROWEJ. PERSPEKTYWA EKONOMII MENEDŻERSKIEJ I ZARZĄDZANIA KAPITAŁEM LUDZKIM

Marcin Murzyn

Wyższa Szkoła Biznesu – National-Louis University w Nowym Sączu

Wydział Nauk Społecznych i Informatyki

ul. Grunwaldzka 17, 33-300 Nowy Sącz

E-mail: mmurzyn@wsb-nlu.edu.pl

1. Wstęp

Początek trzeciej dekady XXI wieku przyniósł dalsze przyspieszenie procesów cyfryzacji gospodarki i życia społecznego. Zjawiska związane z rozwojem sztucznej inteligencji, automatyzacji procesów, analityki danych, Internetu rzeczy oraz technologii chmurowych coraz silniej wpływają nie tylko na funkcjonowanie przedsiębiorstw, lecz również na sposób wykonywania pracy, organizację procesów biznesowych oraz wymagania stawiane pracownikom i kadrze zarządzającej. W konsekwencji obserwowany jest wzrost znaczenia kompetencji, które jeszcze kilka lat temu traktowane były jako specjalistyczne lub charakterystyczne wyłącznie dla sektora nowych technologii. Obecnie stają się one elementem podstawowego wyposażenia zawodowego pracowników wielu branż i sektorów gospodarki [OECD, 2025].

Transformacja cyfrowa nie oznacza jednak wyłącznie wdrażania nowych narzędzi technologicznych. W praktyce jest ona przede wszystkim procesem organizacyjnym, społecznym i kompetencyjnym. O sukcesie wdrożeń technologicznych coraz częściej decyduje nie sama dostępność rozwiązań cyfrowych, lecz zdolność organizacji do ich efektywnego wykorzystania. Jak wskazują wyniki najnowszych badań Gallupa, pomimo dynamicznego rozwoju narzędzi opartych na sztucznej inteligencji wiele organizacji nie osiąga oczekiwanych rezultatów biznesowych z prowadzonych inwestycji technologicznych, co wynika między innymi z niedostatecznego przygotowania kompetencyjnego pracowników oraz kadry kierowniczej [Gallup, 2026].

Równolegle zmianom technologicznym towarzyszą przeobrażenia rynku pracy. Coraz większego znaczenia nabiera model rekrutacji oparty na rzeczywistych umiejętnościach kandydatów, określane mianem podejścia *skills first*. W takim modelu pracodawcy w większym stopniu koncentrują się na konkretnych kompetencjach, zdolności adaptacji do zmian oraz gotowości do ciągłego uczenia się niż na samych formalnych kwalifikacjach czy przebiegu kariery zawodowej. Tendencja ta jest szczególnie widoczna w sektorach związanych z gospodarką cyfrową, gdzie tempo zmian technologicznych powoduje szybkie dezaktualizowanie się części dotychczasowej wiedzy i umiejętności [PARP, 2026].

Zmiany te znajdują odzwierciedlenie również w prognozach dotyczących przyszłości zatrudnienia. Raporty międzynarodowych organizacji, w tym OECD oraz World Economic Forum, wskazują, że do kompetencji o największym znaczeniu należeć będą umiejętności

związane z wykorzystaniem technologii cyfrowych, analizą danych, rozwiązywaniem problemów, krytycznym myśleniem, komunikacją oraz współpracą w środowisku wielokulturowym i międzynarodowym [World Economic Forum, 2025; OECD, 2025]. Oznacza to, że współczesny pracownik powinien nie tylko rozumieć mechanizmy funkcjonowania nowych technologii, lecz także potrafić wykorzystywać je w praktyce zawodowej oraz efektywnie komunikować się w środowisku coraz bardziej globalnej gospodarki.

W literaturze z zakresu ekonomii menedżerskiej oraz zarządzania zasobami ludzkimi podkreśla się, że kompetencje pracowników należy postrzegać jako jeden z najważniejszych zasobów organizacji. W odróżnieniu od zasobów materialnych mogą one podlegać ciągłemu rozwojowi, generować innowacje oraz budować trwałą przewagę konkurencyjną przedsiębiorstwa. Zarządzanie kompetencjami staje się zatem nie tylko elementem polityki personalnej, ale również ważnym instrumentem realizacji strategii organizacji. Szczególnego znaczenia nabiera to w warunkach gospodarki cyfrowej, gdzie zdolność szybkiego dostosowywania się do zmian technologicznych stanowi jeden z podstawowych warunków utrzymania konkurencyjności.

Perspektywa ta znajduje dodatkowe uzasadnienie w personalistycznym spojrzeniu na człowieka obecnym w filozofii Karola Wojtyły, Tadeusza Stycznia oraz Tadeusza Biesagi [Biesaga, 2016]. W ujęciu personalistycznym człowiek nie może być sprowadzony wyłącznie do roli zasobu ekonomicznego lub narzędzia służącego realizacji celów organizacji. Jest on osobą posiadającą własną godność, podmiotowość oraz zdolność do świadomego i odpowiedzialnego działania. Kompetencje zawodowe nie stanowią zatem wyłącznie środka zwiększania produktywności, lecz również element rozwoju osoby ludzkiej, umożliwiający pełniejsze uczestnictwo w życiu społecznym, gospodarczym i zawodowym. Takie podejście pozwala spojrzeć na proces podnoszenia kwalifikacji nie tylko przez pryzmat efektywności ekonomicznej, ale również rozwoju człowieka jako podmiotu pracy.

W tym kontekście, choć niejako na marginesie zawartych w niniejszym tekście analiz, należy dopowiedzieć, że sama nazwa, zastosowana w tytule opracowania, tzn. „zarządzanie kapitałem ludzkim” (względnie: „zarządzanie zasobami ludzkimi”), obarczona jest stylistyczną niefortunnością. Sugeruje, że człowiek może być traktowany niczym „zasób”, obok innych „zasobów”: rzeczowych, finansowych, itp. Wprawdzie teoretycy zarządzania zasobami ludzkimi wyjaśniają, że chodzi nie o reifikację osoby ludzkiej, lecz o efektywne rozporządzanie jej potencjałem (czyli właśnie: „zasobami”, w tym intelektualnymi, fizycznymi, itd.), ale wiadomo, iż język kształtuje nasze postrzeganie rzeczywistości. Toteż adekwatniejsze zdaje się określenie „zarządzanie personelem”. Niemniej w tekście stosuje się nazwę bardziej utartą, z którą polski czytelnik częściej się styka, z tym jednak zastrzeżeniem, że autor tegoż opracowania, jako przyjmujący za własny nurt etyki personalistycznej, sytuuje się jako oponent wszelkich przejawów depersonalizacji w stosunkach gospodarczych.

Celem niniejszego artykułu jest identyfikacja oraz analiza kompetencji, które w świetle aktualnych trendów gospodarczych i technologicznych można uznać za kluczowe dla funkcjonowania współczesnych organizacji. Szczególną uwagę poświęcono trzem grupom kompetencji: związanym z transformacją cyfrową i sztuczną inteligencją, kompetencjom cyfrowym wykorzystywanym w działalności biznesowej oraz kompetencjom komunikacyjnym niezbędnym w warunkach umiędzynarodowienia gospodarki. Analiza

została przeprowadzona na podstawie aktualnych raportów krajowych i międzynarodowych dotyczących rynku pracy, rozwoju technologii oraz kompetencji przyszłości.

Przyjęto założenie, że skuteczne funkcjonowanie organizacji w warunkach gospodarki cyfrowej wymaga jednoczesnego rozwijania wszystkich trzech wskazanych obszarów kompetencyjnych. Sama znajomość technologii nie gwarantuje bowiem sukcesu organizacyjnego, podobnie jak kompetencje biznesowe okazują się niewystarczające bez umiejętności wykorzystania narzędzi cyfrowych oraz sprawnego funkcjonowania w środowisku międzynarodowym. Dopiero ich wzajemne powiązanie tworzy podstawę budowania kapitału ludzkiego odpowiadającego wyzwaniom współczesnego rynku pracy.

2. Materiały i metody

Badanie przeprowadzono z wykorzystaniem metody analizy źródeł wtórnych (*desk research*), polegającej na krytycznej analizie dostępnej literatury naukowej, raportów instytucji publicznych, opracowań branżowych oraz dokumentów strategicznych dotyczących rynku pracy, transformacji cyfrowej i kompetencji przyszłości. Metoda ta jest powszechnie stosowana w badaniach z zakresu ekonomii, zarządzania oraz polityki edukacyjnej, szczególnie w sytuacjach, gdy celem jest identyfikacja trendów, zależności oraz kierunków zmian zachodzących w otoczeniu społeczno-gospodarczym.

Podstawę źródłową artykułu stanowiły aktualne raporty międzynarodowe i krajowe opublikowane w latach 2025–2026. Szczególną uwagę poświęcono opracowaniom przygotowanym przez World Economic Forum, OECD, Gallup, Polską Agencję Rozwoju Przedsiębiorczości, instytucje rynku pracy oraz organizacje analizujące wpływ nowych technologii na zatrudnienie i rozwój kompetencji. Wykorzystano również wyniki badań odnoszących się do sytuacji na polskim rynku pracy, ze szczególnym uwzględnieniem kompetencji wspierających rozwój gospodarki cyfrowej oraz procesów związanych z wdrażaniem sztucznej inteligencji.

Analiza została ukierunkowana na identyfikację kompetencji, które w świetle współczesnych przemian gospodarczych i technologicznych wykazują szczególne znaczenie dla funkcjonowania organizacji oraz rozwoju kapitału ludzkiego. W toku badań wyodrębniono trzy komplementarne obszary kompetencyjne. Pierwszy obejmuje kompetencje związane z transformacją cyfrową, sztuczną inteligencją, analizą danych, Internetem rzeczy oraz nowoczesnymi technologiami wykorzystywanymi w przedsiębiorstwach i instytucjach publicznych. Drugi dotyczy kompetencji cyfrowych wykorzystywanych bezpośrednio w działalności biznesowej, obejmujących między innymi marketing cyfrowy, projektowanie treści cyfrowych oraz zastosowania sztucznej inteligencji w procesach zarządczych i operacyjnych. Trzeci obszar tworzą kompetencje językowe i komunikacyjne niezbędne do funkcjonowania w warunkach globalizacji gospodarki i rosnącej internacjonalizacji rynku pracy.

W ramach analizy zastosowano podejście jakościowe polegające na porównywaniu wyników poszczególnych raportów oraz identyfikowaniu powtarzających się wniosków dotyczących kompetencji uznawanych za kluczowe dla przyszłości rynku pracy. Zestawiono również dane odnoszące się do oczekiwań pracodawców, kierunków rozwoju technologii oraz prognoz dotyczących zmian struktury zatrudnienia. Pozwoliło to na określenie stopnia

zgodności pomiędzy potrzebami gospodarki a kompetencjami rozwijanymi w ramach analizowanych obszarów kształcenia.

Przyjęta metodologia umożliwiła nie tylko opis aktualnej sytuacji, ale również sformułowanie wniosków dotyczących kierunków rozwoju kompetencji szczególnie istotnych z punktu widzenia ekonomii menedżerskiej, zarządzania zasobami ludzkimi oraz długofalowej konkurencyjności organizacji funkcjonujących w warunkach gospodarki cyfrowej.

3. Wyniki

3.1. Transformacja cyfrowa i sztuczna inteligencja jako źródło nowych wymagań kompetencyjnych

Analiza aktualnych raportów krajowych i międzynarodowych wskazuje, że rozwój sztucznej inteligencji oraz technologii cyfrowych stał się jednym z najważniejszych czynników wpływających na współczesny rynek pracy. Zmiany te nie ograniczają się wyłącznie do sektora informatycznego. Coraz wyraźniej oddziałują na administrację publiczną, przemysł, usługi, ochronę zdrowia, edukację, logistykę oraz szeroko rozumiany sektor przedsiębiorstw. W konsekwencji rośnie zapotrzebowanie na pracowników posiadających kompetencje umożliwiające nie tylko korzystanie z nowych technologii, ale również ich wdrażanie, rozwijanie i integrowanie z procesami organizacyjnymi.

Szczególne znaczenia nabierają kompetencje związane ze sztuczną inteligencją. Z raportu Gallup „The State of the Global Workplace 2026” wynika, że organizacje na całym świecie coraz intensywniej inwestują w rozwiązania wykorzystujące AI, jednak jednym z głównych ograniczeń skutecznego wdrażania tych technologii pozostaje niedobór odpowiednio przygotowanych pracowników. Jednocześnie badania pokazują, że pracownicy posiadający kompetencje cyfrowe wykazują większą gotowość do adaptacji zawodowej, szybciej przyswajają nowe narzędzia oraz efektywniej funkcjonują w środowisku podlegającym dynamicznym zmianom technologicznym.

Podobne wnioski płyną z raportu „Future of Jobs Report 2025” przygotowanego przez World Economic Forum. Autorzy prognozują, że w najbliższych latach znacząco wzrośnie zapotrzebowanie na specjalistów zajmujących się sztuczną inteligencją, analizą danych, cyberbezpieczeństwem, automatyzacją procesów oraz technologiami cyfrowymi. Jednocześnie pracodawcy wskazują, że jedną z najważniejszych kompetencji przyszłości będzie zdolność uczenia się nowych technologii i adaptowania się do zmian zachodzących w środowisku pracy [World Economic Forum, 2025].

Wyniki badań prowadzonych na polskim rynku pracy potwierdzają globalne tendencje. Z raportu „Barometr Rynku Pracy 2026” wynika, że pracodawcy coraz częściej wskazują kompetencje cyfrowe jako jeden z kluczowych warunków zatrudnienia. Dotyczy to nie tylko stanowisk technicznych, ale również funkcji związanych z zarządzaniem, marketingiem, sprzedażą, obsługą klienta czy administracją. Coraz większe znaczenie ma umiejętność wykorzystywania narzędzi opartych na sztucznej inteligencji, pracy z danymi oraz sprawnego funkcjonowania w środowisku cyfrowym.

Na szczególną uwagę zasługuje obserwowana zmiana sposobu postrzegania kwalifikacji zawodowych. Jak wskazuje analiza rynku pracy opublikowana przez

„Rzeczpospolitą”, pracodawcy coraz częściej odchodzą od modelu rekrutacji opartego wyłącznie na formalnym wykształceniu na rzecz oceny rzeczywistych kompetencji kandydatów. W praktyce oznacza to wzrost znaczenia umiejętności związanych z rozwiązywaniem problemów, wykorzystywaniem nowych technologii oraz gotowością do ciągłego doskonalenia zawodowego. Kompetencje cyfrowe stają się więc nie tyle dodatkowym atutem, ile jednym z podstawowych wymogów współczesnego rynku pracy.

W świetle przeprowadzonych analiz szczególnie uzasadnione wydaje się rozwijanie kompetencji odpowiadających obszarowi „AI i transformacja cyfrowa”. Dotyczy to zwłaszcza kwalifikacji rozwijanych w ramach kursów: „Specjalista ds. transformacji cyfrowej i wdrażania AI”, „Robotyka i AI”, „IoT i analiza danych” oraz „Nowoczesna diagnostyka i edukacja w erze AI i neurotechnologii”. Programy te odpowiadają bowiem na potrzeby rynku związane zarówno z wykorzystaniem sztucznej inteligencji, jak i z szerszym procesem cyfrowej transformacji organizacji. Kursy takie, począwszy od roku 2026, wprowadza nowosądecka Wyższa Szkoła Biznesu – National-Louis University.

Warto podkreślić, że znaczenie tych kompetencji wykracza poza aspekt stricte technologiczny. Z perspektywy ekonomii menedżerskiej stanowią one element budowania przewagi konkurencyjnej przedsiębiorstw oraz zwiększania efektywności procesów organizacyjnych. Z kolei z punktu widzenia rozwoju kapitału ludzkiego umożliwiają pracownikom aktywne uczestnictwo w przemianach gospodarczych, ograniczając ryzyko wykluczenia zawodowego wynikającego z postępującej automatyzacji i cyfryzacji procesów pracy.

3.2. Kompetencje cyfrowe i komunikacyjne w gospodarce opartej na wiedzy

Transformacja cyfrowa wpływa nie tylko na rozwój zaawansowanych technologii, ale również na sposób funkcjonowania przedsiębiorstw w ich codziennej działalności. Coraz większa część procesów biznesowych realizowana jest za pośrednictwem narzędzi cyfrowych, platform internetowych oraz systemów wspomagających zarządzanie informacją. Powoduje to wzrost znaczenia kompetencji pozwalających skutecznie wykorzystywać technologie cyfrowe w działalności gospodarczej, marketingowej i organizacyjnej [Pocztowski, 2018].

Z analiz rynku pracy wynika, że szczególnie poszukiwani są obecnie pracownicy potrafiący łączyć wiedzę biznesową z umiejętnością korzystania z nowoczesnych narzędzi cyfrowych. Dotyczy to między innymi tworzenia treści cyfrowych, prowadzenia działań marketingowych w środowisku internetowym, analizowania danych dotyczących zachowań klientów oraz wykorzystywania narzędzi sztucznej inteligencji do wspierania procesów sprzedażowych i komunikacyjnych. Według badań rynku pracy coraz większa liczba przedsiębiorstw deklaruje potrzebę rozwijania kompetencji związanych z marketingiem cyfrowym, zarządzaniem informacją oraz efektywnym wykorzystaniem danych w procesach podejmowania decyzji gospodarczych.

Szczególne znaczenie posiadają kompetencje rozwijane w ramach kursów „Projektowanie treści cyfrowych”, „Digital Marketing” oraz „AI w biznesie”. Odpowiadają one bowiem na potrzeby przedsiębiorstw funkcjonujących w warunkach gospodarki opartej na wiedzy, w której informacja staje się jednym z najważniejszych zasobów organizacji. Współczesne przedsiębiorstwa konkurują nie tylko jakością produktów lub usług, lecz

również zdolnością docierania do klientów za pomocą kanałów cyfrowych, budowania relacji z odbiorcami oraz analizowania danych generowanych przez użytkowników.

Jednocześnie proces globalizacji gospodarki powoduje wzrost znaczenia kompetencji komunikacyjnych i językowych. Współpraca międzynarodowa, rozwój usług świadczonych na odległość oraz funkcjonowanie organizacji w środowisku wielokulturowym sprawiają, że znajomość języków obcych coraz częściej stanowi warunek skutecznego uczestnictwa w rynku pracy. Dotyczy to szczególnie języka angielskiego, który pozostaje podstawowym językiem komunikacji biznesowej, naukowej i technologicznej, ale również języka niemieckiego, odgrywającego istotną rolę w relacjach gospodarczych Polski z krajami Europy Zachodniej.

Znaczenie kompetencji językowych wykracza jednak poza samą zdolność komunikowania się. W praktyce umożliwiają one dostęp do wiedzy specjalistycznej, międzynarodowych zasobów edukacyjnych, nowoczesnych technologii oraz zagranicznych rynków pracy. W warunkach dynamicznego rozwoju sztucznej inteligencji i gospodarki cyfrowej szczególnego znaczenia nabiera także umiejętność posługiwania się specjalistycznym słownictwem technologicznym i biznesowym. Właśnie temu służą kursy „English for Digital Business and AI” oraz „Deutsch für Business und internationale Zusammenarbeit”, których zakres tematyczny winien zostać powiązany z rzeczywistymi potrzebami współczesnej gospodarki. Doprecyzowania wymaga, że angielski, a w dalszej kolejności niemiecki, są w zglobalizowanych realiach współczesnych niczym *lingua franca*. Toteż z punktu widzenia gospodarki zasadne jest rozwijanie kompetencji właśnie z tymi językami związanymi.

Przeprowadzona analiza wskazuje, że kompetencje cyfrowe, biznesowe i komunikacyjne nie funkcjonują obecnie jako odrębne obszary wiedzy. Coraz częściej tworzą one wzajemnie powiązany system kompetencji umożliwiających skuteczne funkcjonowanie zarówno pracowników, jak i organizacji. Przedsiębiorstwo wykorzystujące nowoczesne technologie potrzebuje bowiem osób zdolnych nie tylko do obsługi narzędzi cyfrowych, ale również do interpretowania danych, komunikowania wyników analiz oraz współpracy w środowisku międzynarodowym. Z tego względu rozwój wszystkich trzech grup kompetencji należy postrzegać jako element spójnej strategii budowania kapitału ludzkiego odpowiadającego wymaganiom współczesnej gospodarki.

3.3. Synteza wyników i implikacje dla rozwoju kapitału ludzkiego

Przeprowadzona analiza wskazuje, że współczesny rynek pracy znajduje się pod silnym wpływem procesów cyfryzacji, automatyzacji oraz rozwoju sztucznej inteligencji. Jednocześnie rośnie znaczenie kompetencji umożliwiających efektywne funkcjonowanie w środowisku opartym na wiedzy, danych i współpracy międzynarodowej. Zarówno raporty międzynarodowe, jak i krajowe potwierdzają, że przewagą konkurencyjną organizacji coraz częściej buduje nie sam dostęp do technologii, lecz zdolność pracowników do jej praktycznego wykorzystywania [Skrzypek, 2016].

Analizowane źródła pozwalają wyróżnić trzy komplementarne grupy kompetencji o szczególnym znaczeniu dla współczesnych organizacji: kompetencje związane z transformacją cyfrową i sztuczną inteligencją, kompetencje cyfrowe wykorzystywane w działalności biznesowej oraz kompetencje komunikacyjne wspierające funkcjonowanie

w środowisku międzynarodowym. W praktyce obszary te wzajemnie się uzupełniają, tworząc fundament rozwoju nowoczesnego kapitału ludzkiego [Armstrong, 2022].

Z perspektywy ekonomii menedżerskiej oznacza to konieczność traktowania rozwoju kompetencji jako inwestycji strategicznej. Organizacje zdolne do skutecznego rozwijania kompetencji swoich pracowników uzyskują większą elastyczność działania, łatwiej adaptują się do zmian technologicznych oraz skuteczniej wykorzystują potencjał innowacji. Tym samym kompetencje stają się jednym z głównych zasobów warunkujących długofalową konkurencyjność przedsiębiorstw i instytucji funkcjonujących w gospodarce cyfrowej [Drucker, 2009].

4. Podsumowanie

Przeprowadzone analizy potwierdzają, że rozwój gospodarki cyfrowej prowadzi do istotnych zmian w strukturze kompetencji oczekiwanych przez pracodawców. Coraz większego znaczenia nabierają umiejętności związane z wykorzystaniem sztucznej inteligencji, analizą danych, komunikacją cyfrową oraz funkcjonowaniem w środowisku międzynarodowym. Jednocześnie obserwowane zmiany nie ograniczają się do sektora nowych technologii, lecz obejmują praktycznie wszystkie obszary współczesnej gospodarki. Wyniki badań wskazują, że skuteczne wdrażanie nowych technologii wymaga nie tylko inwestycji w infrastrukturę techniczną, ale przede wszystkim rozwijania kompetencji pracowników i kadry zarządzającej. W tym kontekście szczególnego znaczenia nabiera kształcenie ustawiczne oraz tworzenie elastycznych form podnoszenia kwalifikacji zawodowych odpowiadających na dynamicznie zmieniające się potrzeby rynku pracy.

Analiza pozwoliła wyróżnić trzy wzajemnie powiązane grupy kompetencji istotnych dla funkcjonowania współczesnych organizacji: kompetencje związane z transformacją cyfrową i sztuczną inteligencją, kompetencje cyfrowe wykorzystywane w działalności biznesowej oraz kompetencje komunikacyjne niezbędne w warunkach umiędzynarodowienia gospodarki. Ich rozwój należy postrzegać jako element budowania nowoczesnego kapitału ludzkiego zdolnego do efektywnego działania w warunkach gospodarki opartej na wiedzy.

Z punktu widzenia ekonomii menedżerskiej kompetencje te stanowią jeden z najważniejszych zasobów organizacji. Odpowiednie zarządzanie ich rozwojem może wpływać na wzrost efektywności, innowacyjności oraz zdolności adaptacyjnych przedsiębiorstw. Jednocześnie, odwołując się do personalistycznej koncepcji człowieka, należy podkreślić, że rozwój kompetencji nie jest wyłącznie narzędziem zwiększania produktywności, lecz również ważnym elementem rozwoju osoby ludzkiej. To właśnie człowiek pozostaje podmiotem procesów gospodarczych, a technologia – niezależnie od stopnia zaawansowania – powinna pełnić wobec niego funkcję służebną.

W świetle przedstawionych analiz można stwierdzić, że inwestowanie w rozwój kompetencji przyszłości stanowi jedno z najważniejszych wyzwań stojących zarówno przed organizacjami, jak i instytucjami edukacyjnymi. Od skuteczności tych działań zależeć będzie zdolność społeczeństw i gospodarek do wykorzystania możliwości, jakie niesie ze sobą postępująca transformacja cyfrowa.

Bibliografia:

1. Armstrong M. (2022). Zarządzanie zasobami ludzkimi. Warszawa: Wolters Kluwer.
2. Biesaga T. (2016). Podstawy etyki i bioetyki. Kraków: Wydawnictwo Naukowe Uniwersytetu Papieskiego Jana Pawła II w Krakowie.
3. Drucker P.F. (2009). Zarządzanie w XXI wieku. Warszawa: MT Biznes.
4. Gallup. (2026). State of the Global Workplace 2026: The Human Side of the AI Revolution. Washington, D.C.: Gallup Inc.
5. OECD. (2025). OECD Skills Outlook 2025: Building the Skills of the 21st Century for All. Paris: OECD Publishing.
6. PARP. (2026). Czy polskie firmy są gotowe na AI? Najnowsze wyniki badania Bilansu Kapitału Ludzkiego. Warszawa: Polska Agencja Rozwoju Przedsiębiorczości.
7. PARP, System Rad Sektorowych ds. Kompetencji. (2026). Rynek pracy, edukacja, kompetencje. Aktualne trendy i wyniki badań. Styczeń 2026. Warszawa: Polska Agencja Rozwoju Przedsiębiorczości.
8. Personnel Service. (2026). Barometr Polskiego Rynku Pracy. Raport Personnel Service. IX edycja, I półrocze 2026. Wrocław: Personnel Service S.A.
9. Pochtowski A. (2018). Zarządzanie zasobami ludzkimi. Strategie – procesy – metody. Warszawa: Polskie Wydawnictwo Ekonomiczne.
10. Rzeczpospolita. (2026). AI zmienia podejście do kandydatów. Zwiększa nacisk na kompetencje. Rzeczpospolita, 1 czerwca 2026 r.
11. Skrzypek E. (2016). Zarządzanie wiedzą i kapitałem intelektualnym w organizacji. Lublin: Uniwersytet Marii Curie-Skłodowskiej.
12. World Economic Forum. (2025). The Future of Jobs Report 2025. Geneva: World Economic Forum.
13. Zielona Linia. (2026). Czy polskie firmy są gotowe na AI? Warszawa: Centrum Informacyjne Służb Zatrudnienia Zielona Linia.

9. ANALIZA INTERWENCJI POLICJI ORAZ POGOTOWIA RATUNKOWEGO ZWIĄZANYCH Z KRYZYSAMI SUICYDALNYMI W GDAŃSKU W LATACH 2024–2025 Z UWZGLĘDNIENIEM WYBRANYCH CZYNNIKÓW TEMPORALNYCH I ŚRODOWISKOWYCH

mgr Kamil Przybyszewski

ORCID 0009-0001-2366-0867

E-mail: kamil745@vp.pl

Abstrakt: Celem artykułu była analiza liczby interwencji Policji oraz Pogotowia Ratunkowego związanych z kryzysami suicydalnymi w Gdańsku w latach 2024–2025 oraz ocena wpływu wybranych czynników temporalnych i środowiskowych na ich częstość. Badanie oparto na danych operacyjnych pozyskanych w trybie dostępu do informacji publicznej: analiza objęła 4779 interwencji Policji (730 dni) oraz 310 interwencji Pogotowia Ratunkowego (250 dni z co najmniej jedną interwencją). Jednostką analizy był dzień kalendarzowy. Uwzględniono trzy zmienne niezależne: fazę Księżyca (osiem faz astronomicznych), dzień tygodnia (w tym typ dnia: roboczy/weekend/święteczny) oraz miesiąc kalendarzowy jako wskaźnik sezonowości. Analizę statystyczną przeprowadzono za pomocą testu Kruskal-Wallis ($\alpha = 0,05$). Żadna z badanych zmiennych nie osiągnęła progu istotności statystycznej. Wyniki wskazują, że dynamika interwencji związanych z kryzysami suicydalnymi w Gdańsku nie była istotnie modulowana przez żaden z analizowanych czynników temporalnych. Faza Księżyca nie powinna być brana pod uwagę przy alokacji zasobów służb interwencyjnych.

Słowa kluczowe: zachowania suicydalne, interwencje kryzysowe, faza Księżyca, sezonowość, dzień tygodnia, system reagowania kryzysowego, Gdańsk

1. Wstęp

Zachowania suicydalne stanowią istotny problem zdrowia publicznego i bezpieczeństwa społecznego. Współczesne badania podkreślają ich wieloczynnikowy charakter, determinowany przez uwarunkowania psychologiczne, społeczne oraz środowiskowe [WHO, 2025]. W ostatnich latach szczególne znaczenie przypisuje się czynnikom temporalnym i środowiskowym, takim jak sezonowość, temperatura powietrza, długość dnia, zanieczyszczenie powietrza oraz rytmy biologiczne, które mogą modulować ryzyko zachowań autodestrukcyjnych [Chen i in., 2025; Lai i in., 2026].

Badania suicydologiczne konsekwentnie wskazują na występowanie wyraźnych wzorców czasowych w liczbie samobójstw i prób samobójczych – zarówno sezonowych, jak i związanych z dniem tygodnia czy innymi cyklicznymi zjawiskami środowiskowymi [Gold i in., 2025]. Metaanalizy potwierdzają wzrost częstości zachowań suicydalnych w miesiącach wiosennych i letnich, co obserwuje się zarówno w półkuli północnej, jak i południowej [Coimbra i in., 2026; To i in., 2024]. Coraz silniejsze dowody łączą podwyższone ryzyko z ekspozycją na wysokie temperatury i zanieczyszczenie powietrza,

przy czym efekty te są szczególnie wyraźne w kontekście zmian klimatycznych [Villeneuve i in., 2023].

Kluczowym źródłem danych w badaniach nad zachowaniami suicydalnymi pozostają systemy reagowania kryzysowego, w tym interwencje służb publicznych. Policja i zespoły ratownictwa medycznego są pierwszymi podmiotami reagującymi na sytuacje zagrożenia życia i zdrowia psychicznego. Analiza ich danych operacyjnych umożliwia precyzyjne mapowanie skali i dynamiki zdarzeń suicydalnych w przestrzeni społecznej [Dudzinski i in., 2024].

W Polsce problematyka suicydalna nabiera szczególnego znaczenia w świetle danych epidemiologicznych. Według Komendy Głównej Policji w 2023 roku odnotowano łącznie ponad 15 000 prób samobójczych (9,6 tys. wśród mężczyzn i 5,5 tys. wśród kobiet), a śmierć w wyniku samobójstwa poniosły 5 233 osoby, spośród których 84,1% stanowili mężczyźni. Według danych KGP w 2024 roku liczba samobójstw wyniosła 4 845, co oznacza spadek o 21,4% w porównaniu do 2014 roku. Liczba prób samobójczych wzrosła o 5,9% względem roku poprzedniego a najnowsze dostępne dane za 2025 rok wskazują, że liczba ta jest niższa o niemal 100 przypadków [KGP, 2026].

Dane te plasują Polskę powyżej średniej europejskiej pod względem współczynnika samobójstw wśród mężczyzn. Jednocześnie system reagowania kryzysowego pozostaje w Polsce stosunkowo słabo przebadany empirycznie – zdecydowana większość rodzimych publikacji koncentruje się na epidemiologii samobójstw dokonanych, pomijając analizę danych operacyjnych służb publicznych jako odrębnego źródła informacji o skali zjawiska. Niniejsze badanie wpisuje się w ten niedostatecznie eksplorowany obszar, podejmując próbę analizy danych operacyjnych na poziomie jednego dużego miasta.

Wśród cyklicznych zjawisk przyrodniczych analizowanych w literaturze znajdują się fazy Księżyca, które od dawna budzą zainteresowanie w kontekście potencjalnego wpływu na funkcjonowanie psychiczne człowieka. Wyniki badań pozostają jednak niejednoznaczne: część wskazuje na brak istotnych statystycznie zależności [Plöderl i in., 2023], podczas gdy nowsze doniesienia sugerują wzrost ryzyka w określonych podgrupach [Bhagar i in., 2023].

Celem niniejszego artykułu jest analiza liczby interwencji Policji oraz zespołów ratownictwa medycznego związanych z kryzysami suicydalnymi na terenie Gdańska w latach 2024–2025 oraz identyfikacja ewentualnych zależności pomiędzy ich występowaniem a wybranymi czynnikami temporalnymi i środowiskowymi. Hipoteza główna zakłada, że liczba interwencji różni się istotnie statystycznie w zależności od wybranych czynników temporalnych. W ramach hipotez szczegółowych przyjęto, że: (1) liczba interwencji różni się istotnie w zależności od fazy Księżyca; (2) liczba interwencji różni się istotnie w zależności od dnia tygodnia; (3) liczba interwencji wykazuje sezonowość w ujęciu miesięcznym.

2. Materiał i metody

Materiał badawczy stanowiły zagregowane, anonimowe dane operacyjne dotyczące interwencji służb publicznych związanych z kryzysami suicydalnymi na terenie Gdańska w okresie od 1 stycznia 2024 r. do 31 grudnia 2025 r. Dane zostały pozyskane w trybie dostępu do informacji publicznej na podstawie ustawy z dnia 6 września 2001 r. o dostępie do informacji publicznej (Dz.U. 2001 nr 112 poz. 1198 ze zm.), w drodze wniosków

skierowanych do Komendy Miejskiej Policji w Gdańsku oraz SP ZOZ Stacji Pogotowia Ratunkowego w Gdańsku.

Dane policyjne obejmowały zdarzenia zakwalifikowane jako interwencje wobec osób w kryzysie psychicznym, w tym zachowania autoagresywne, myśli i groźby samobójcze oraz inne przejawy ostrego kryzysu psychicznego. Dane Pogotowia Ratunkowego obejmowały zlecenia, w których w opisie rozpoznania (ROZPOZNANIE_OPIS) występowały kody wskazujące na zamierzone samouszkodzenie, zatrucie w celach samobójczych lub ostry kryzys psychiczny.

Jednostką analizy był dzień kalendarzowy ($n = 730$). Policja odnotowała interwencje w 729 dniach (łącznie 4779 zdarzeń). Pogotowie Ratunkowe odnotowało interwencje w 250 spośród 730 dni (łącznie 310 interwencji) – w pozostałych 480 dniach nie odnotowano zdarzeń spełniających kryteria kwalifikacji. W konsekwencji analizy statystyczne dla Pogotowia Ratunkowego przeprowadzono na podzbiorze dni z co najmniej jedną interwencją ($n = 250$), podczas gdy dla Policji uwzględniono pełny zbiór dni ($n = 730$, z 729 dniami z interwencją). Należy podkreślić, że jest to różnica metodologiczna: dla Pogotowia analizowano zatem nie tyle wpływ czynników temporalnych na dzienną liczbę interwencji w ogóle, ile na ich liczbę w dniach, w których do interwencji doszło. Jeśli rozkład dni zerowych nie jest losowy względem badanych zmiennych (fazy Księżyca, dnia tygodnia, miesiąca), może to wpływać na kierunek lub siłę obserwowanych zależności. Nie można wykluczyć, że część interwencji zarejestrowanych w tym samym dniu przez obie służby dotyczyła tej samej osoby.

Zmienną zależną była dzienna liczba interwencji (zmienna zliczeniowa). Jako zmienne niezależne uwzględniono: (1) fazę Księżyca – osiem faz astronomicznych na podstawie oficjalnych danych astronomicznych; (2) dzień tygodnia – siedem kategorii oraz podział na typ dnia (roboczy/weekend/święteczny); (3) miesiąc kalendarzowy – jako wskaźnik sezonowości.

Ze względu na charakter zmiennej zależnej zastosowano test Kruskal-Wallis ($\alpha = 0,05$). Ze względu na liczbę przeprowadzonych testów (dziesięć niezależnych testów Kruskal-Wallis obejmujących obie służby i trzy zmienne niezależne) nie zastosowano formalnej korekty na wielokrotne testowanie (np. Bonferroniego). Wybór testu nieparametrycznego był podyktowany charakterem zmiennej zależnej – dzienna liczba interwencji jest zmienną zliczeniową o rozkładzie prawostronnie skośnym, niespełniającym założeń normalności wymaganych przez parametryczne testy wariancji (ANOVA). Test Kruskal-Wallis, jako nieparametryczny odpowiednik jednoczynnikowej analizy wariancji, pozwala na porównanie median między więcej niż dwiema grupami niezależnymi bez zakładania normalności rozkładu, co czyni go właściwym narzędziem dla tego typu danych operacyjnych. Analizy wykonano w języku Python 3 z wykorzystaniem bibliotek pandas oraz scipy.stats.

3. Wyniki i dyskusja

Analiza danych operacyjnych z lat 2024–2025 objęła łącznie 730 dni. Średnia dzienna liczba interwencji wynosiła 6,56 ($\pm 2,72$) dla Policji oraz 1,24 ($\pm 0,53$) dla Pogotowia Ratunkowego (liczona na dniach z co najmniej jedną interwencją). Żadna z trzech analizowanych zmiennych nie osiągnęła progu istotności statystycznej.

Faza Księżyca. Test Kruskal-Wallis nie wykazał istotnych statystycznie różnic między ośmioma fazami Księżyca ani dla Policji ($H = 6,19$; $p = 0,517$), ani dla Pogotowia Ratunkowego ($H = 4,30$; $p = 0,745$). Szczegółowe dane przedstawia Tabela 1.

Tabela 1. Statystyka opisowa interwencji według faz Księżyca (2024–2025)

Faza Księżyca	Policja Średnia	Policja (dni)	Pogotowie Średnia	Pogotowie (dni)
Sierp rosnący	6,849	93	1,125	32
Pierwsza kwadra	6,645	93	1,296	27
Garbaty rosnący	6,602	88	1,343	35
Pełnia	6,533	90	1,235	34
Garbaty malejący	6,789	90	1,233	30
Ostatnia kwadra	6,516	91	1,200	25
Sierp malejący	6,457	94	1,263	38
Nów	5,978	91	1,207	29
Test K-W	H = 6,19; p = 0,517		H = 4,30; p = 0,745	

Źródło: opracowanie własne na podstawie danych KMP Gdańsk, SPR Gdańsk i danych astronomicznych.

Wyniki są zgodne z przeważającą większością współczesnych badań suicydologicznych. Plöderl i in. [2023] w analizie danych skandynawskich nie potwierdzili istotnego efektu fazy Księżyca, wskazując jednocześnie na możliwość artefaktów statystycznych w badaniach raportujących pozytywne wyniki. Bhagar i in. [2023] dokonali przeglądu potencjalnych mechanizmów biologicznych — zakłócenia rytmów circadianowych, zmiany wydzielania melatoniny, zaburzenia snu — mogących teoretycznie łączyć fazy Księżyca z zachowaniami suicydalnymi, jednak autorzy podkreślają brak spójnych dowodów empirycznych na poziomie populacyjnym. Niewielkie zróżnicowanie średnich zaobserwowane w niniejszym badaniu mieści się w granicach losowych fluktuacji i nie powinno być interpretowane jako przesłanka do uwzględniania faz Księżyca przy planowaniu zasobów służb interwencyjnych.

Warto również odnotować szerszy kontekst metodologiczny tego wyniku. Badania analizujące związek faz Księżyca z zachowaniami ludzkimi są szczególnie podatne na błędy wielokrotnego testowania oraz efekt szuflady publikacyjnej – tzn. tendencję do publikowania wyłącznie wyników pozytywnych przy jednoczesnym pomijaniu wyników zerowych. Niniejsze badanie, raportując brak istotnych różnic na podstawie dużej i jednorodnej próby operacyjnej, stanowi wartościowy wkład w korektę tego błędu w literaturze suicydologicznej

Dzień tygodnia i typ dnia. Test Kruskal-Wallis nie wykazał istotnych statystycznie różnic między dniami tygodnia ani dla Policji ($H = 3,90$; $p = 0,691$), ani dla Pogotowia ($H = 8,60$; $p = 0,197$). Porównanie trzech typów dnia również nie osiągnęło progu istotności:

Policja ($H = 3,18$; $p = 0,204$), Pogotowie ($H = 2,60$; $p = 0,272$). Szczegółowe dane przedstawia Tabela 2.

Tabela 2. Średnia dzienna liczba interwencji według typu dnia

Typ dnia	Policja Średnia	– n (dni)	Pogotowie – Średnia
Dzień roboczy	6,67	503	1,21
Weekend	6,31	201	1,30
Dzień świąteczny	6,08	26	1,30
Test K-W	H = 3,18; p = 0,204		H = 2,60; p = 0,272

Źródło: opracowanie własne.

Wynik jest odmienny od obserwowanego w badaniach Gold i in. [2025], którzy w analizie danych dotyczących weteranów w USA odnotowali istotnie wyższą liczbę samobójstw w weekendy i dni świąteczne, wiążąc ten efekt z ograniczoną dostępnością ambulatoryjnej opieki psychiatrycznej oraz nasileniem konsumpcji alkoholu. Możliwym wyjaśnieniem braku podobnego efektu w niniejszym badaniu jest specyfika gdańskiego systemu reagowania kryzysowego, w którym dyżury służb są planowane niezależnie od dnia tygodnia. Warto podkreślić, że odnotowane różnice w średnich nie wskazują nawet na kierunek zgodny z hipotezą — najwyższą średnią dla Policji odnotowano dla dni roboczych (6,67), a najniższą dla świątecznych (6,08) — co stanowi wynik wymagający dalszej weryfikacji na większych zbiorach danych i z uwzględnieniem zmiennych zakłócających.

Interesującym kierunkiem dalszej analizy byłoby skrzyżowanie zmiennej typu dnia z danymi o poziomie spożycia alkoholu lub liczbą interwencji z powodu upojenia alkoholowego w tym samym okresie – dane takie są dostępne w systemach ewidencji Policji i mogłyby pozwolić na weryfikację mechanizmu wyjaśniającego obserwowany wzorzec oraz jego relację z dynamiką interwencji suicydalnych.

Sezonowość. Żadna z analiz sezonowości nie osiągnęła progu istotności: analiza miesięczna dla Policji ($H = 18,14$; $p = 0,078$), dla Pogotowia ($H = 6,23$; $p = 0,858$); porównanie grup sezonowych dla Policji ($H = 4,14$; $p = 0,126$), dla Pogotowia ($H = 0,09$; $p = 0,955$). Szczegółowe dane miesięczne dla Policji przedstawia Tabela 3.

Tabela 3. Średnia dzienna liczba interwencji Policji według miesiąca (2024–2025)

Miesiąc	Średnia	n (dni)	Miesiąc	Średnia	n (dni)
Styczeń	7,13	62	Lipiec	5,92	62
Luty	5,91	57	Sierpień	6,82	62
Marzec	6,95	62	Wrzesień	6,88	60
Kwiecień	6,00	60	Październik	6,79	62
Maj	5,98	62	Listopad	6,77	60

Czerwiec	6,77	60	Grudzień	6,59	61
Test K-W (12 m-cy)	H = 18,14		p = 0,078		

Źródło: opracowanie własne.

Wynik dla Policji ($p = 0,078$) jest bliski przyjętemu progowi istotności. To i in. [2024] w analizie danych amerykańskich z lat 2015–2020 wykazali wyraźny efekt letni, szczególnie u młodszych grup wiekowych, natomiast Coimbra i in. [2026] potwierdzili sezonowe wzorce suicydalne w Brazylii. Brak istotnej sezonowości w niniejszym badaniu może być częściowo wyjaśniony relatywnie krótkim okresem obserwacji – dwuletnia próba ogranicza moc statystyczną do wykrywania umiarkowanych efektów sezonowych, które ujawniają się wyraźniej w analizach wieloletnich. Wynik bliski progowi istotności ($p = 0,078$) nie pozwala wykluczyć obecności umiarkowanego efektu sezonowego, którego wykrycie mogłoby wymagać dłuższego okresu obserwacji i większej mocy statystycznej; równie prawdopodobne jest jednak, że obserwowana różnica odzwierciedla naturalną zmienność losową.

Porównanie służb. Policja interweniowała niemal codziennie (729 dni na 730), natomiast Pogotowie – w 250 dniach (34,2% dni). Średnia liczba interwencji na dzień była ponad pięciokrotnie wyższa dla Policji (6,56) niż dla Pogotowia (1,24). Dudzinski i in. [2024] w analogicznej analizie dotyczącej polskich strażaków wykazali, że służby ratownicze uczestniczą jedynie w wybranym spektrum zdarzeń behawioralnych, co koresponduje z obserwowaną dysproporcją. Policja reaguje na szerokie spektrum zachowań suicydalnych – od myśli i gróźb po kryzysy psychiczne, podczas gdy Pogotowie interweniuje głównie przy bezpośrednim zagrożeniu życia wymagającym pomocy medycznej.

4. Wnioski

Na podstawie przeprowadzonej analizy danych operacyjnych Policji i Pogotowia Ratunkowego w Gdańsku z lat 2024–2025 sformułowano następujące wnioski:

Faza Księżyca nie wykazuje istotnego statystycznie związku z liczbą interwencji służb publicznych związanych z kryzysami suicydalnymi – ani dla Policji ($H = 6,19$; $p = 0,517$), ani dla Pogotowia Ratunkowego ($H = 4,30$; $p = 0,745$). Wynik jest zgodny z dominującym nurtem współczesnych badań suicydologicznych. Faza Księżyca nie powinna stanowić kryterium planowania zasobów służb interwencyjnych. Dzień tygodnia oraz typ dnia nie różnicują istotnie liczby interwencji w badanej próbie. Odnotowane różnice w średnich nie wskazują na kierunek zgodny z hipotezą i wymagają weryfikacji na większych zbiorach danych z uwzględnieniem zmiennych zakłócających, takich jak poziom spożycia alkoholu czy dostępność ambulatoryjnej opieki psychiatrycznej.

Sezonowość nie osiągnęła progu istotności statystycznej, jednak wynik dla Policji w analizie miesięcznej ($p = 0,078$) jest bliski temu progowi, co sugeruje potencjalny efekt sezonowy możliwy do wykrycia przy dłuższym okresie obserwacji.

Policja interweniuje niemal codziennie i rejestruje ponad pięciokrotnie więcej zdarzeń na dzień niż Pogotowie Ratunkowe, co odzwierciedla zasadnicze różnice w zakresie kompetencji obu służb. Planowanie systemu reagowania kryzysowego w obszarze zachowań suicydalnych powinno opierać się na danych empirycznych, a nie na

powszechnych przekonaniach dotyczących ryzyka w określonych dniach czy fazach Księżyca. Niezbędne są dalsze badania obejmujące dłuższy okres obserwacji (minimum 4–5 lat), dane z wielu miast i regionów Polski oraz zmienne meteorologiczne – temperaturę, długość dnia, ciśnienie atmosferyczne i nasłonecznienie – które mogą okazać się silniejszymi predyktorami dynamiki interwencji kryzysowych niż analizowane w niniejszym badaniu czynniki temporalne.

Bibliografia:

1. Bhagar, R., Le-Niculescu, H., Roseberry, K., Kosary, K., Daly, C., Ballew, A., Yard, M., Sandusky, G. E., Niculescu, A. B. (2023). Temporal effects on death by suicide: empirical evidence and possible molecular correlates. *Discover Mental Health*, 3, 10.
2. Coimbra, D. G., Coelho, J. A. P. de M., de Andrade, T. G. (2026). Spatiotemporal patterns and environmental correlates of suicide seasonality in Brazil. *Journal of Affective Disorders*, 401, 121269.
3. Dudzinski, L., Czyzewski, L., Gałazkowski, R., Jaskiewicz, F., Nadolny, K., Kubiak, T. (2024). Polish firefighters’ participation in interventions related to behavioral disorders in the 2020–2022 period: an observation of incidents. *Healthcare*, 12(23), 2482.
4. Gold, S. A., Goodrich, M., Morley, S. W., Stephens, B., McCarthy, J. F. (2025). Temporal patterns of Veteran suicide: variation by season, day of the week, and holidays. *Suicide and Life-Threatening Behavior*, 55(2), e13148.
5. Lai, K. Y., Bauermeister, S., Sarkar, C. (2026). Associations of heat exposure with mental health and suicide in children and adolescents: a systematic review and meta- analysis. *npj Mental Health Research*, 5, 7.
6. Plöderl, M., Westerlund, J., Hökby, S., Hadlaczky, G., Hengartner, M. P. (2023). Increased suicide risk among younger women in winter during full moon in northern Europe. An artifact or a novel finding? *Molecular Psychiatry*, 28, 901–907.
7. To, S., Messias, E., Burch, L., Chibnall, J. (2024). Seasonal variation in suicide: age group and summer effects in the United States (2015–2020). *BMC Psychiatry*, 24, 856.
8. Villeneuve, P. J., Huynh, D., Lavigne, É., Colman, I., Anisman, H., Peters, C., Rodríguez-Villamizar, L. A. (2023). Daily changes in ambient air pollution concentrations and temperature and suicide mortality in Canada: findings from a national time-stratified case-crossover study. *Environmental Research*, 223, 115477.
9. World Health Organization [WHO] (2025). Suicide prevention: aktualizacja danych 2023–2025. Geneva: WHO.

Źródła internetowe

10. Komenda Główna Policji (2026). Zamachy samobójcze w Polsce w 2023, 2024, 2025 roku. Warszawa: KGP. Dane opracowane na podstawie: <https://statystyka.policja.pl> (dostęp 13.05.2026 r.).

10. TRANSFORMACJA MIKSU ENERGETYCZNEGO REPUBLIKI CZESKIEJ W LATACH 1993–2025

mgr inż. Piotr Sikorski

Politechnika Krakowska im. Tadeusza Kościuszki

Wydział Inżynierii Środowiska i Energetyki

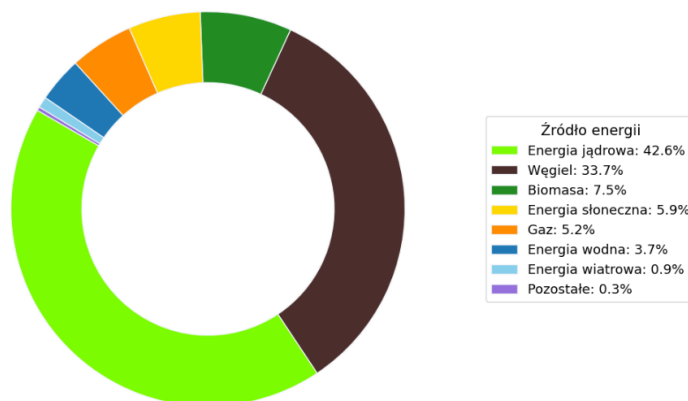
ORCID ID: 0009-0006-9208-2622

1. Wstęp

Powstanie Republiki Czeskiej 1 stycznia 1993 roku, będące rezultatem pokojowego rozpadu Czechosłowacji, oznaczało przejęcie przez nowo utworzone państwo rozbudowanego systemu energetycznego, którego podstawę stanowiły elektrownie opalane węglem brunatnym i kamiennym. Przez kolejne trzy dekady kraj ten przeszedł głęboką transformację sektora energii – od centralnie planowanej gospodarki opartej na węglu i energii jądrowej, przez próby dywersyfikacji i liberalizacji rynku, aż po dzisiejsze dylematy związane z dekarbonizacją i wymogami unijnej polityki klimatycznej. Historia czeskiego miks energetycznego jest w gruncie rzeczy historią zmagania między pragmatyzmem przemysłowym a koniecznością środowiskową, między lokalnym interesem a europejskim zobowiązaniem, między dziedzictwem socjalistycznej industrializacji a ambicjami nowoczesnego państwa.

2. Stan aktualny i zmiany struktury misku energetycznego

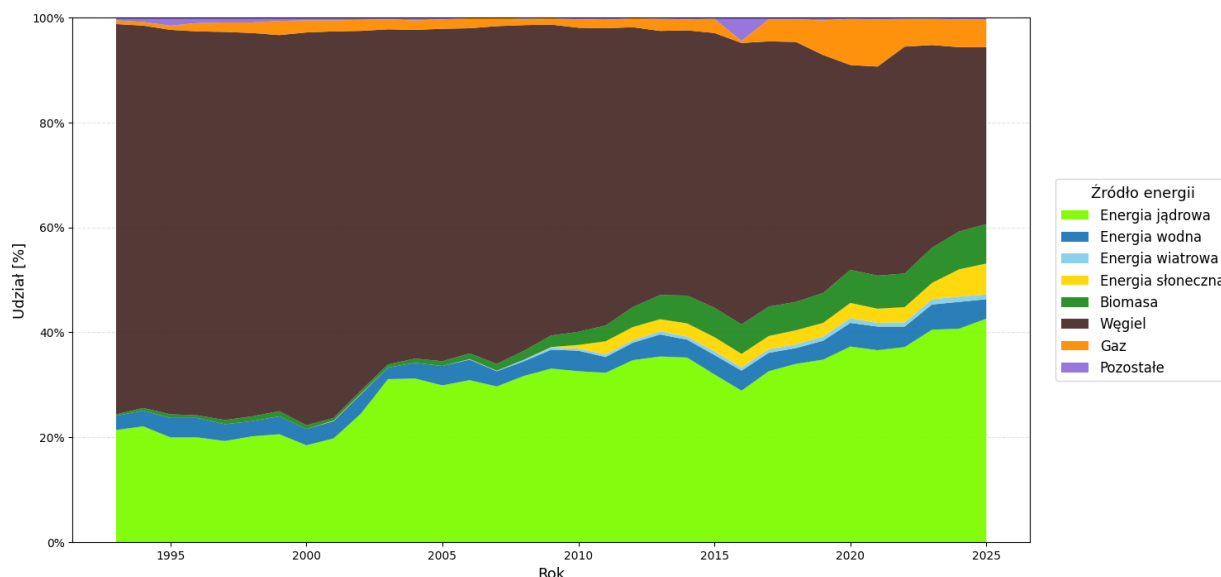
Wieloletnie przemiany zachodzące w czeskim sektorze energetycznym doprowadziły do istotnych zmian w strukturze wykorzystywanych źródeł energii. Proces transformacji, uwzględniający stopniowe ograniczanie węgla, rozwój energetyki jądrowej oraz wzrost udziału odnawialnych źródeł energii, wpłynął na obecny kształt krajowego miks energetycznego. Szczególnie widoczne jest to, że Republika Czeska intensyfikuje działania związane z realizacją celów klimatycznych Unii Europejskiej, jednocześnie dążąc do utrzymania wysokiego poziomu bezpieczeństwa energetycznego.



Wykres 1. Miks energetyczny Republiki Czeskiej w 2025 roku

Źródło: [10] Opracowanie własne.

Przedstawiona struktura miksu energetycznego Republiki Czeskiej w 2025 roku (Wykres.1) wskazuje na dominującą rolę energetyki jądrowej, której udział wynosi 42,6% całkowitej produkcji energii. Wynik ten potwierdza strategiczne znaczenie elektrowni Dukovany i Temelín dla krajowego systemu elektroenergetycznego oraz realizowanej polityki dekarbonizacji. Drugim najważniejszym źródłem energii pozostaje węgiel, odpowiadający za 33,7% produkcji energii elektrycznej. Pomimo systematycznego spadku jego znaczenia w porównaniu z początkiem lat dziewięćdziesiątych XX wieku, paliwo to nadal stanowi istotny element zapewniający stabilność dostaw energii. Łączny udział odnawialnych źródeł energii (OZE) wynosi około 18%, przy czym największe znaczenie posiada biomasa (7,5%) oraz energia słoneczna (5,9%). Energetyka wodna odpowiada za 3,7% produkcji energii elektrycznej - jej rozwój jest ograniczony przez stosunkowo niewielki potencjał hydroenergetyczny kraju. Energetyka wiatrowa pozostaje słabo rozwinięta, osiągając jedynie 0,9% udziału w miksie energetycznym. Jej ograniczony rozwój wynika przede wszystkim z uwarunkowań geograficznych oraz lokalnych nastrojów społecznych. Gaz ziemny odpowiada za 5,2% krajowej produkcji energii i pełni głównie funkcję źródła wspomagającego oraz bilansującego system energetyczny. Pozostałe źródła mają marginalne znaczenie, stanowiąc zaledwie 0,3% całkowitej produkcji. Przedstawione dane wskazują, że energetyka jądrowa pozostaje kluczowym narzędziem realizacji celów klimatycznych zapewniając tym samym również bezpieczeństwo energetyczne państwa. Oprócz analizy struktury miksu energetycznego w roku 2025 istotne znaczenie ma również obserwacja zmian zachodzących w dłuższej perspektywie czasowej. Analiza udziału poszczególnych źródeł energii w produkcji pozwala ocenić kierunek oraz tempo transformacji energetycznej Republiki Czeskiej oraz dalsze perspektywy rozwoju. Poniżej przedstawiona została ewolucja czeskiego miksu energetycznego w latach 1993–2025 (Wykres.2), uwzględniając najważniejsze źródła energii wykorzystywane w krajowym systemie elektroenergetycznym.



Wykres 2. Zmiany struktury miksu energetycznego Republiki Czeskiej w latach 1993–2025

Źródło: [10] Opracowanie własne.

W momencie powstania niepodległej Republiki Czeskiej w 1993 roku krajowy system energetyczny był w zdecydowanej większości oparty na węglu brunatnym i kamiennym. Udział tych surowców przekraczał 74% całkowitej produkcji energii elektrycznej, co stanowiło bezpośrednie dziedzictwo gospodarcze po Czechosłowacji. Duże znaczenie miały przede wszystkim bogate złoża węgla brunatnego zlokalizowane w północnych Czechach oraz rozbudowana infrastruktura energetyczna rozwijana jeszcze w okresie gospodarki centralnie planowanej. Elektrownie takie jak Tušimice, Pruněrov, Počerady czy Mělník stanowiły podstawę funkcjonowania krajowego systemu elektroenergetycznego, zapewniając stabilne dostawy energii dla rozwiniętego sektora przemysłowego oraz gospodarstw domowych. W tym samym czasie energetyka jądrowa odgrywała rolę uzupełniającą, odpowiadając za około 21% produkcji energii elektrycznej. Fundamentem sektora atomowego była funkcjonująca od połowy lat osiemdziesiątych (1985) elektrownia jądrowa Dukovany, która już w pierwszych latach istnienia niepodległych Czech stanowiła istotny element. Odnawialne źródła energii miały natomiast znaczenie marginalne i ograniczały się głównie do energetyki wodnej, której potencjał rozwojowy był stosunkowo niewielki. Pierwszym przełomowym momentem w transformacji czeskiej energetyki okazało się uruchomienie dwóch bloków elektrowni jądrowej Temelín w latach 2000–2002. Inwestycja ta znacząco zwiększyła moce wytwórcze sektora jądrowego i doprowadziła do wyraźnego wzrostu udziału energii atomowej w krajowym miksie energetycznym. Dzięki uruchomieniu nowych bloków jądrowych energia atomowa zaczęła stopniowo przejmować część produkcji realizowanej wcześniej przez elektrownie węglowe. W rezultacie udział energii jądrowej systematycznie wzrastał, osiągając poziom przekraczający 31% już w pierwszej dekadzie XXI wieku. Jednocześnie rozpoczął się proces stopniowego ograniczania znaczenia węgla, choć przez długi czas pozostawał on najważniejszym źródłem energii elektrycznej w kraju. Kolejny etap transformacji związany był z przystąpieniem Republiki Czeskiej do Unii

Europejskiej w 2004 roku. Integracja ze wspólnotowym rynkiem energii oraz konieczność realizacji europejskiej polityki klimatycznej wpłynęły na kierunki rozwoju krajowego sektora energetycznego. Szczególne znaczenie miał rozwój Europejskiego Systemu Handlu Emisjami (EU ETS), który stopniowo zwiększał koszty funkcjonowania elektrowni opartych na paliwach kopalnych. Jednocześnie wdrażano kolejne regulacje środowiskowe nakierowane na ograniczanie emisji gazów cieplarnianych oraz poprawę jakości powietrza. Czynniki te doprowadziły do stopniowego spadku konkurencyjności energetyki węglowej oraz zwiększenia zainteresowania alternatywnymi źródłami energii. Od około 2010 roku widoczny stał się również rozwój odnawialnych źródeł energii - szczególnie dynamiczny wzrost odnotowały systemy fotowoltaiczne (energetyka słoneczna), której rozwój był wspierany przez krajowe i unijne programy inwestycyjne. W kolejnych latach coraz większe znaczenie zaczęła odgrywać także biomasa, wykorzystująca potencjał rolniczy i leśny kraju. Mimo to udział odnawialnych źródeł energii rozwijał się wolniej niż w wielu państwach Europy, co wynikało między innymi z silnej pozycji energetyki jądrowej oraz ograniczonego potencjału energetyki wiatrowej. Szczególnie wyraźne zmiany można zaobserwować po 2015 roku. W tym okresie nastąpiło znaczne przyspieszenie procesu odchodzenia od węgla. Było to związane przede wszystkim z gwałtownym wzrostem cen uprawnień do emisji dwutlenku węgla w ramach systemu EU ETS, zaostrzeniem norm środowiskowych oraz rosnącą presją polityczną na realizację celów klimatycznych Unii Europejskiej. Dodatkowo wiele czeskich elektrowni węglowych osiągało kres swojej żywotności technicznej, co wymagało kosztownych modernizacji lub całkowitego wyłączenia z eksploatacji (np. Prunéřov I - ostatecznie wyłączona w 2020 roku, Mělník III - ostatecznie wyłączona w 2021 roku). W rezultacie produkcja energii z węgla stawała się coraz mniej opłacalna ekonomicznie w porównaniu z energetyką jądrową oraz OZE. W ostatnich latach analizowanego okresu Czechy wyraźnie umocniły pozycję jednego z „najbardziej jądrowych państw” Europy Środkowej. W 2023 roku udział energii jądrowej przekroczył 40% całkowitej produkcji energii elektrycznej, czyniąc ją najważniejszym źródłem energii w kraju. Jednocześnie udział węgla spadł do około jednej trzeciej produkcji energii elektrycznej, co stanowi jedną z największych zmian strukturalnych w historii czeskiego sektora energetycznego. Proces ten pokazuje, że transformacja energetyczna Republiki Czeskiej miała charakter ewolucyjny i opierała się przede wszystkim na rozwoju energetyki jądrowej jako głównego narzędzia dekarbonizacji. Dzięki temu krajowi udało się stopniowo ograniczać emisyjność sektora elektroenergetycznego przy jednoczesnym zachowaniu wysokiego poziomu bezpieczeństwa energetycznego.

3. Energetyka węglowa

Energetyka węglowa przez dziesięciolecia stanowiła fundament czeskiego systemu elektroenergetycznego. W momencie powstania Republiki Czeskiej w 1993 roku ponad 74% energii elektrycznej produkowano z wykorzystaniem węgla brunatnego i kamiennego. Wynikało to przede wszystkim z dużej dostępności krajowych złóż surowca oraz rozbudowanej infrastruktury energetycznej odziedziczonej po Czechosłowacji. Najważniejsze obszary wydobywania znajdowały się w północnych Czechach, gdzie funkcjonowały zagłębia Mostecké i Sokolovské. W regionach tych rozwinęło się górnictwo odkrywkowe, które przez wiele lat stanowiło jeden z filarów krajowej gospodarki. Kluczową rolę w systemie

elektroenergetycznym odgrywały elektrownie Tušimice, Prunéřov, Počerady, Ledvice oraz Mělník. Jednostki te zapewniały stabilne dostawy energii, jednak jednocześnie były znaczącym źródłem emisji dwutlenku węgla, tlenków siarki i pyłów. W latach dziewięćdziesiątych rozpoczęto proces modernizacji sektora, obejmujący instalację systemów odsiarczania spalin oraz poprawę sprawności bloków energetycznych. Celem tych działań było ograniczenie negatywnego wpływu energetyki węglowej na środowisko naturalne. Pomimo modernizacji udział węgla pozostawał wysoki przez pierwsze dwie dekady XXI wieku. Dopiero po przystąpieniu Czech do Unii Europejskiej i wdrożeniu Europejskiego Systemu Handlu Emisjami (EU ETS) zaczęły pojawiać się silniejsze bodźce ekonomiczne skłaniające do ograniczania wykorzystania paliw kopalnych. Rosnące ceny uprawnień do emisji CO₂ powodowały wzrost kosztów funkcjonowania elektrowni węglowych, co stopniowo obniżało ich konkurencyjność względem alternatywnych źródeł energii. Po 2015 roku proces odchodzenia od węgla znacząco przyspieszył. Wynikało to nie tylko z polityki klimatycznej Unii Europejskiej, ale również ze starzenia się infrastruktury energetycznej. Wiele bloków energetycznych wymagało kosztownych modernizacji lub wyłączenia z eksploatacji. W rezultacie udział węgla w produkcji energii elektrycznej spadł do około 34% w 2025 roku. Pomimo tego węgiel nadal pozostawał istotnym elementem czeskiego miksu energetycznego, pełniąc funkcję stabilnego źródła energii wspierającego pracę całego systemu elektroenergetycznego.

Tabela 2. Wybrane czeskie elektrownie węglowe

Elektrownia	Główne paliwo	Moc zainstalowana
Počerady	Węgiel brunatny	1000 MW
Tušimice	Węgiel brunatny	800 MW
Prunéřov	Węgiel brunatny	750 MW
Ledvice	Węgiel brunatny	770 MW
Dětmárovice	Węgiel kamienny	600 MW

Źródło: <https://database.earth/energy/power-plants>

4. Energetyka jądrowa

Energetyka jądrowa stanowi jeden z najważniejszych filarów czeskiego systemu energetycznego i odgrywa kluczową rolę w procesie transformacji energetycznej państwa. Jej rozwój rozpoczął się jeszcze w okresie istnienia Czechosłowacji wraz z budową elektrowni jądrowej Dukovany. Obiekt ten wyposażony jest w cztery reaktory typu VVER-440/V213, których moc cieplna wynosi około 1375 MWt każdy. Początkowa moc elektryczna poszczególnych bloków wynosiła 440 MWe, jednak dzięki modernizacjom została zwiększona do 510 MWe. Łączna moc elektrowni przekracza obecnie 2040 MWe. Poszczególne bloki uruchamiano w latach 1985–1987, a dzięki modernizacjom pozostają one jednym z najważniejszych źródeł energii elektrycznej w kraju. Przełomowym momentem dla rozwoju czeskiej energetyki jądrowej było uruchomienie drugiej elektrowni jądrowej, Temelín. Znajdują się w niej dwa bloki wyposażone w reaktory typu VVER-1000/V320 o mocy cieplnej około 3120 MWt każdy. Początkowa moc elektryczna bloków wynosiła około 912 MWe, natomiast po przeprowadzonych modernizacjach wzrosła do 1080 MWe. Pierwszy blok został oddany do eksploatacji w 2000 roku, drugi natomiast dwa lata później.

Uruchomienie Temelína znacząco zwiększyło produkcję energii elektrycznej pochodzącej z energetyki jądrowej i umożliwiło ograniczenie udziału elektrowni węglowych. W przeciwieństwie do wielu państw Europy Zachodniej Czechy konsekwentnie wspierają rozwój energetyki jądrowej. Po katastrofie w Fukushima w 2011 roku nie zdecydowano się na zmianę strategicznego kierunku rozwoju sektora. Wręcz przeciwnie – kolejne dokumenty strategiczne wskazywały energetykę jądrową jako podstawowe narzędzie dekarbonizacji gospodarki. W 2025 roku energia jądrowa odpowiadała za około 43% produkcji energii elektrycznej, co czyniło ją najważniejszym źródłem energii w kraju. Istotne znaczenie mają również plany dalszej rozbudowy sektora. Władze Republiki Czeskiej przewidują budowę nowych bloków jądrowych, przede wszystkim w lokalizacji Dukovany. Inwestycje te mają umożliwić zastępowanie wycofywanych elektrowni węglowych oraz utrzymanie wysokiego poziomu bezpieczeństwa energetycznego. Energetyka jądrowa pozostaje zatem fundamentem czeskiej strategii energetycznej i jednym z głównych elementów realizacji polityki klimatycznej państwa.

Tabela 2. Czeskie elektrownie jądrowe

Elektrownia	Ilość bloków jądrowych	Typ reaktora	Moc brutto	Moc netto
EJ Dukovany	4	WWER440/V213	2040 MW	1900 MW
EJ Temelín	2	WWER100/V320	2160 MW	2052 MW

Źródło: <https://database.earth/energy/power-plants>

5. Odnawialne źródła energii

Przez znaczną część analizowanego okresu odnawialne źródła energii odgrywały w Republice Czeskiej rolę marginalną. Sytuacja zaczęła się zmieniać dopiero po przystąpieniu kraju do Unii Europejskiej oraz wdrożeniu polityki wspierającej rozwój niskoemisyjnych technologii energetycznych. Największy wzrost odnotowała energetyka słoneczna, która szczególnie dynamicznie rozwijała się po 2010 roku. Wprowadzenie systemów wsparcia inwestycyjnego oraz spadek kosztów technologii fotowoltaicznych przyczyniły się do powstawania licznych farm słonecznych oraz instalacji prosumenckich. Drugim istotnym filarem odnawialnych źródeł energii stała się biomasa. Jej rozwój był związany z wykorzystaniem zasobów leśnych oraz odpadów pochodzenia rolniczego. Biomasa znalazła zastosowanie zarówno w produkcji energii elektrycznej, jak i w sektorze ciepłowniczym. W efekcie stała się jednym z najważniejszych odnawialnych źródeł energii w kraju. Znaczącą rolę odgrywa również energetyka wodna, choć jej potencjał rozwojowy jest ograniczony przez warunki geograficzne. Największe elektrownie wodne funkcjonują na Wełtawie, w tym obiekty Orlík, Lipno i Slapy. Łączna moc elektrowni wodnych przekracza 2 GW, jednak ich udział w produkcji energii pozostaje stosunkowo stabilny i nie ulega znaczącym zmianom. Najmniejsze znaczenie spośród głównych odnawialnych źródeł energii posiada energetyka wiatrowa. W przeciwieństwie do Niemiec czy Danii Czechy nie dysponują szczególnie korzystnymi warunkami wiatrowymi. Dodatkowym ograniczeniem są procedury administracyjne oraz opór części społeczności lokalnych wobec budowy nowych farm wiatrowych. W rezultacie udział energii wiatrowej w krajowym miksie energetycznym pozostaje niewielki. Pomimo tych ograniczeń odnawialne źródła energii systematycznie zwiększały swój udział w produkcji energii elektrycznej. W 2025 roku odpowiadały już za

około 18% krajowej produkcji energii. Choć wynik ten pozostaje niższy niż w wielu państwach Europy Zachodniej, wskazuje na stopniowe dostosowywanie czeskiego sektora energetycznego do wymogów transformacji energetycznej i polityki klimatycznej Unii Europejskiej.

Tabela 3. Wybrane obiekty OZE w Czechach

Elektrownia	Typ	Moc zainstalowana
Orlík	przepływowo-zbiornikowa	364 MW
Dlouhé Stráně	szczytowo-pompowa	650 MW
Slapy	przepływowo-zbiornikowa	144 MW
Štěchovice	szczytowo-pompowa	68 MW
Kořensko	przepływowa	4 MW
Hněvkovice	przepływowa	9,6 MW
Ralsko	farma fotowoltaiczna	38,3 MW
Mimoň	farma fotowoltaiczna	17,5 MW
Rapotín	biogazownia/biometanownia	3 MW
Pustějov	biogazownia	2 MW

Źródło: <https://database.earth/energy/power-plants>

6. Pozostałe

Oprócz energetyki węglowej, jądrowej i odnawialnych źródeł energii, w czeskim systemie elektroenergetycznym istotną, choć znacznie mniejszą rolę odgrywają również inne nośniki energii. Najważniejszym z nich jest gaz ziemny, którego znaczenie zaczęło wzrastać szczególnie po 2000 roku. Elektrownie gazowe i jednostki kogeneracyjne wykorzystywane są przede wszystkim do stabilizowania pracy systemu elektroenergetycznego oraz pokrywania szczytowego zapotrzebowania na energię. W przeciwieństwie do wielu państw Europy Zachodniej Czechy nie uczyniły jednak gazu podstawowym paliwem przejściowym w procesie transformacji energetycznej. Wynikało to z silnej pozycji energetyki jądrowej oraz dostępności krajowych zasobów węgla. Znaczenie gazu ziemnego wzrosło po wybuchu wojny rosyjsko-ukraińskiej w 2022 roku, kiedy kwestie bezpieczeństwa dostaw energii ponownie znalazły się w centrum debaty publicznej. W odpowiedzi Czechy podjęły działania mające na celu dywersyfikację kierunków dostaw surowca oraz ograniczenie zależności od rosyjskiego gazu. Marginalną rolę w produkcji energii elektrycznej odgrywają również produkty naftowe. Ze względu na wysokie koszty paliwa wykorzystywane są one przede wszystkim w sytuacjach awaryjnych lub w niewielkich jednostkach energetycznych. Ich udział w miksie energetycznym pozostaje nieznaczny. Istotnym elementem czeskiego sektora energetycznego jest również handel energią elektryczną. Dzięki rozwiniętej energetyce jądrowej i znaczącej produkcji energii z elektrowni konwencjonalnych Czechy przez większość analizowanego okresu pozostawały eksporterem netto energii elektrycznej. Kraj odgrywa ważną rolę w regionalnym rynku energii Europy Środkowej, dostarczając energię między innymi do Niemiec, Austrii i Słowacji. Fakt ten dodatkowo wzmacnia znaczenie czeskiego sektora elektroenergetycznego w regionie i wpływa na strategiczne decyzje dotyczące jego dalszego rozwoju.

Tabela 4. Wybrane czeskie elektrownie gazowe

Elektrownia	Typ	Moc netto
Počerady	blok gazowo-parowy (CCGT)	838 MW
Teplárna Kladno	kogeneracja gazowa	200 MW
Teplárna Brno	gazowa CHP	130 MW

Źródło: <https://database.earth/energy/power-plants>

7. Podsumowanie

Przeprowadzona analiza transformacji miksu energetycznego Republiki Czeskiej w latach 1993–2025 pozwala na sformułowanie istotnych wniosków. Wzrost udziału energii jądrowej z 21,4% do 42,6% potwierdza skuteczność długoterminowej polityki inwestycyjnej państwa, przy czym Elektrownia Jądrowa Dukovany i Elektrownia Jądrowa Temelín pełnią funkcję źródła podstawowego (tzw. baseload) w systemie elektroenergetycznym, tym samym zapewniając bezpieczeństwo energetyczne kraju. Ponadto udział elektrowni węglowych wciąż jest obecny w czeskim miksie energetycznym, jednak systematycznie maleje z 74,3% w 1993 roku do około 33,7% w 2025 roku, co wynika z rosnących cen uprawnień do emisji CO₂ w ramach systemu EU ETS, zaostreżania norm środowiskowych Unii Europejskiej oraz stopniowego wygaszania najmniej efektywnych bloków energetycznych. Zróżnicowana dynamika wzrostu poszczególnych odnawialnych źródeł energii wskazuje na bariery strukturalne, w tym uwarunkowania geograficzne oraz opór społeczny, czego przykładem jest słaby rozwój energetyki wiatrowej (0,9%) w porównaniu do fotowoltaiki (5,9%) i biomasy (7,5%). Gaz ziemny pełni rolę uzupełniającą i bilansującą, a jego znaczenie wzrosło po 2022 roku w kontekście dywersyfikacji dostaw po wybuchu wojny rosyjsko-ukraińskiej. Przedstawione wnioski wskazują, że czeska ścieżka transformacji energetycznej stanowi istotny przypadek badawczy w literaturze przedmiotu, ilustrujący możliwość dekarbonizacji systemu elektroenergetycznego z zachowaniem bezpieczeństwa dostaw i akceptacji społecznej dla energetyki jądrowej.

Bibliografia:

1. Ministry of Industry and Trade of the Czech Republic. (2004). State Energy Policy of the Czech Republic. Prague: Ministry of Industry and Trade.
2. Ministry of Industry and Trade of the Czech Republic. (2015). State Energy Policy of the Czech Republic. Prague: Ministry of Industry and Trade.
3. Ministry of Industry and Trade of the Czech Republic. (2020). National Energy and Climate Plan of the Czech Republic. Prague: Ministry of Industry and Trade.
4. Ministry of Industry and Trade of the Czech Republic. (2024). State Energy Policy of the Czech Republic. Prague: Ministry of Industry and Trade.
5. Kardaś, S. (2020). Czechia's Climate Policy and Energy Transformation. Warsaw: Centre for Eastern Studies (OSW).
6. International Energy Agency. (2021). Czech Republic 2021: Energy Policy Review. Paris: International Energy Agency.
7. Kpler Insights. (2026). Czechia's coal phase-out roadmap and long-term nuclear outlook.
8. International Energy Agency. (2021). Czech Republic 2021: Energy Policy Review. Paris: IEA.

9. ČEZ Group. Annual Report 2024.

Wykaz stron internetowych

10. <https://lowcarbonpower.org/region/Czechia>
11. <https://pris.iaea.org/PRIS/CountryStatistics/CountryDetails.aspx?current=CZ>
12. <https://ourworldindata.org/profile/energy/czechia>
13. <https://cnpp.iaea.org/public/countries/CZ/profile/preview>
14. <https://database.earth/energy/power-plants>

11. WPLYW ŚRODKÓW PIANOTWÓRCZYCH UŻYWANYCH W TRAKCIE GASZENIA POŻARU NA ŚRODOWISKO WODNE

Kamil Sobociński

Firma: POŻARNICY.PL Sp. z o.o.

Ul. Dębowa 14, 81-623 Gdynia

E-mail: kontakt@pozarnicy.pl

1. Wstęp

Pożary należą do najpoważniejszych zagrożeń dla życia, zdrowia ludzi oraz środowiska naturalnego. W wielu przypadkach skuteczne prowadzenie działań ratowniczo-gaśniczych wymaga stosowania specjalistycznych środków gaśniczych, w tym środków pianotwórczych. Dzięki swoim właściwościom fizykochemicznym, wytworzona piana skutecznie odcina dopływ tlenu do palącej się substancji, ograniczając wydzielanie par palnych oraz zapewniając efekt chłodzenia.

Rozwój technologii środków pianotwórczych sprawił, że ich skuteczność gaśnicza znacząco wzrosła. Szczególnie duże znaczenie miało opracowanie pian typu AFFF (Aqueous Film Forming Foam), które od lat 60. XX wieku były szeroko wykorzystywane przez straże pożarne, lotniska, zakłady petrochemiczne oraz jednostki wojskowe. Zastosowanie fluorowanych środków powierzchniowo czynnych umożliwiała szybkie tworzenie cienkiej warstwy wodnej na powierzchni palącej się cieczy, co znacząco zwiększało efektywność gaszenia.

Jednocześnie z upływem czasu zaczęto dostrzegać negatywne konsekwencje środowiskowe wynikające z powszechnego stosowania pian gaśniczych. Wody popożarowe zawierające środki pianotwórcze bardzo często przedostają się do kanalizacji deszczowej, cieków wodnych, jezior lub infiltrują do wód podziemnych. Wraz z nimi do środowiska trafiają liczne związki chemiczne o różnym stopniu toksyczności oraz trwałości.

Szczególne obawy budzą substancje per- i polifluoroalkilowe (PFAS), które przez wiele lat stanowiły podstawowy składnik najbardziej skutecznych pian gaśniczych. Związki te charakteryzują się wyjątkową odpornością na rozkład chemiczny, biologiczny i fotochemiczny, dlatego określane są mianem „wiecznych chemikaliów” (ang. *forever chemicals*). Ich obecność stwierdzono w wodach powierzchniowych, wodach podziemnych, osadach dennych, organizmach zwierząt oraz organizmie człowieka.

Rosnąca liczba badań naukowych wskazuje, że niekontrolowane stosowanie pian zawierających PFAS może prowadzić do długotrwałego skażenia środowiska oraz zwiększonego ryzyka zdrowotnego dla ludzi. W odpowiedzi na wyniki tych badań wiele państw oraz instytucji międzynarodowych rozpoczęło proces wycofywania pian fluorowanych i zastępowania ich środkami bezfluorowymi.

Celem niniejszego opracowania jest przedstawienie wpływu środków pianotwórczych stosowanych podczas działań ratowniczo-gaśniczych na środowisko wodne, ze szczególnym uwzględnieniem mechanizmów zanieczyszczania wód, oddziaływania na organizmy wodne

oraz aktualnych kierunków ograniczania negatywnego wpływu pian gaśniczych na środowisko.

2. Charakterystyka środków pianotwórczych.

Środki pianotwórcze są skoncentrowanymi preparatami chemicznymi przeznaczonymi do wytwarzania piany gaśniczej poprzez zmieszanie z wodą i powietrzem. W zależności od rodzaju koncentratu oraz sposobu napowietrzania możliwe jest uzyskanie pian lekkich, średnich oraz ciężkich, różniących się strukturą, trwałością oraz przeznaczeniem.

Podstawowym składnikiem każdego środka pianotwórczego są substancje powierzchniowo czynne (surfaktanty), których zadaniem jest zmniejszenie napięcia powierzchniowego wody. Dzięki temu możliwe jest tworzenie stabilnych pęcherzyków powietrza otoczonych cienką warstwą cieczy. Oprócz surfaktantów koncentraty zawierają stabilizatory piany, środki zapobiegające zamarzaniu, inhibitory korozji, rozpuszczalniki oraz dodatki poprawiające odporność piany na wysoką temperaturę. W ich składzie znajdują się także konserwanty oraz barwniki.

Ze względu na skład chemiczny oraz przeznaczenie wyróżnia się kilka podstawowych grup środków pianotwórczych.

Proteinowe środki pianotwórcze (P – z ang. Protein) – są to wodne roztwory zhydrolizowanych białek pochodzenia zwierzęcego. W ich skład wchodzi także stabilizatory, konserwanty, substancje chroniące przed zamarzaniem oraz substancje antykorozyjne. Do ich produkcji używa się białek pochodzenia zwierzęcego (kopyt, kości i piór). Charakteryzują się dobrą odpornością na wysoką temperaturę oraz stosunkowo dużą trwałością mechaniczną. Obecnie ich znaczenie stopniowo maleje ze względu na pojawienie się bardziej skutecznych pian syntetycznych.

Fluoroproteinowe środki pianotwórcze (FP – z ang. Fluoroprotein) – są to koncentraty pianotwórcze zawierające zarówno zhydrolizowane białka jak i fluorowane związki powierzchniowo – czynne (surfaktanty). Piany wytworzone z tego rodzaju koncentratów charakteryzują się większą płynnością niż te powstałe ze środków proteinowych. Są one również odporne na zanieczyszczenia cieczami węglowodorowymi dzięki czemu mogą być podawane bezpośrednio na powierzchnię płonącego paliwa lub podpowierzchniowo poprzez odpowiednie urządzenia. Obecność związków fluorowych powoduje zwiększone ryzyko skażenia środowiska.

Proteinowe środki pianotwórcze tworzące film wodny (FFFP – z ang. Film Forming Fluoroprotein) – są to fluoroproteinowe środki pianotwórcze z dodatkami surfaktantów tworzących film wodny. Cechą, która odróżnia je od zwykłych środków typu FP jest to, że wyciekający z piany roztwór tworzy na powierzchni palnej cieczy tzw. film wodny, który dobrze zabezpiecza przed ponownym zapaleniem. Piana wytworzona ze środka typu FFFP jest bardziej płynna niż piany typu P i FP i znajduje zastosowanie wyłącznie do gaszenia pożarów paliw węglowodorowych.

Syntetyczne środki pianotwórcze (S – z ang. Synthetic) – są to środki pianotwórcze, których podstawowym składnikiem są węglowodorowe związki powierzchniowo czynne. Wytworzona z nich piana posiada mniejszą odporność termiczną niż piany na bazie proteinowych koncentratów. Ich zaletą jest uniwersalność – można je wykorzystać do wytworzenia piany ciężkiej, średniej i lekkiej oraz zastosować w charakterze zwilżaczy.

Syntetyczne środki pianotwórcze tworzące film wodny (AFFF – z ang. Aqueous Film Forming Foam) – są to koncentraty na podstawie syntetycznych związków powierzchniowo czynnych, które dodatkowo tworzą film wodny na powierzchni paliw węglowodorowych. Film, który tworzy się na powierzchni lepiej ją chłodzi i izoluje, niż typowe środki proteinowe i syntetyczne. Film powstaje nie tylko bezpośrednio pod pianą, ale również w jej pobliżu, dzięki czemu lepiej izoluje palną powierzchnię. Środki typu AFFF przeznaczone są do wytwarzania przede wszystkim pian ciężkich.

Alkoholoodporne środki pianotwórcze (AR – z ang. Alcohol Resistant) – są to koncentraty bazujące na innych grupach środków pianotwórczych. Zawierają one dodatkowo polimery rozpuszczalne w wodzie, dzięki czemu między pianą a cieczą polarną tworzy się warstwa żelowanego polimeru, utrudniająca niszczenie piany.

Środki pianotwórcze klasy A – w ich skład wchodzi stężone mieszaniny związków powierzchniowo czynnych, rozpuszczalników oraz substancji nadających trwałość pianie. Piana wytworzona z tego rodzaju środka jest dość trwała i posiada zdolność wnikania w porowate, trudno zwilżalne powierzchnie.

Środki pianotwórcze do wytwarzania pian ograniczających parowanie substancji niebezpiecznych – są to specjalne środki pianotwórcze lub odpowiednio zmodyfikowane środki alkoholoodporne, mające zwiększoną odporność na destrukcyjne działanie różnego rodzaju cieczy, uznawanych za niebezpieczne. W zależności od rodzaju tej cieczy, piany takie ograniczają parowanie w czasie od kilkudziesięciu minut do kilkudziesięciu godzin.

3. Mechanizm działania pian gaśniczych

Skuteczność piany gaśniczej wynika z jednoczesnego działania kilku mechanizmów fizycznych. Najważniejszym z nich jest odcięcie dopływu tlenu do powierzchni palącej się substancji. Powstała warstwa piany tworzy szczelną izolację pomiędzy paliwem a otoczeniem, ograniczając możliwość dalszego przebiegu procesu spalania.

Drugim istotnym mechanizmem jest chłodzenie powierzchni pożaru. Woda zawarta w pianie odbiera znaczne ilości ciepła podczas odparowywania, co powoduje obniżenie temperatury materiału palnego poniżej temperatury zapłonu.

Równie ważną funkcję pełni tłumienie emisji par substancji palnych. Ma to szczególne znaczenie podczas gaszenia benzyny, oleju napędowego, paliwa lotniczego czy rozpuszczalników organicznych. Ograniczenie parowania zmniejsza ryzyko ponownego zapłonu oraz wystąpienia wybuchu.

Choć mechanizmy te zapewniają wysoką skuteczność gaszenia, ich zastosowanie wiąże się z powstawaniem znacznych ilości zanieczyszczonych wód popożarowych. Woda użyta podczas akcji gaśniczej miesza się z koncentratem pianotwórczym, produktami spalania oraz substancjami chemicznymi znajdującymi się w miejscu pożaru. Powstała mieszanina może zawierać metale ciężkie, wielopierścieniowe węglowodory aromatyczne (WWA), produkty spalania tworzyw sztucznych oraz związki PFAS. W przypadku braku odpowiedniego zabezpieczenia miejsca działań ratowniczych zanieczyszczenia te przedostają się do kanalizacji deszczowej, rzek, jezior lub infiltrują do warstw wodonośnych, powodując długotrwałe skażenie środowiska.

4. Drogi przedostawania się środków pianotwórczych do środowiska wodnego

W trakcie prowadzenia działań ratowniczo-gaśniczych znaczne ilości wody gaśniczej wraz z koncentratem środka pianotwórczego oraz produktami spalania przedostają się do środowiska. Ilość powstających ścieków popożarowych zależy od rodzaju pożaru, czasu prowadzenia akcji gaśniczej, zastosowanej techniki gaszenia oraz ilości wykorzystanego środka pianotwórczego. W przypadku pożarów magazynów, rafinerii, baz paliwowych czy zakładów chemicznych objętość zanieczyszczonych wód może wynosić nawet kilkaset metrów sześciennych.

Do środowiska wodnego środki pianotwórcze przedostają się przede wszystkim poprzez spływ powierzchniowy. Woda wykorzystywana podczas gaszenia pożaru spływa po utwardzonych nawierzchniach do kanalizacji deszczowej, skąd często trafia bezpośrednio do odbiorników wodnych. W sytuacji braku systemów retencyjnych lub urządzeń odcinających odpływ zanieczyszczonych ścieków dochodzi do niekontrolowanego skażenia rzek, jezior oraz zbiorników retencyjnych.

Drugą drogą migracji jest infiltracja do gruntu. W przypadku pożarów prowadzonych na terenach nieutwardzonych wody popożarowe wsiąkają w glebę, a następnie przemieszczają się do warstw wodonośnych. Proces ten jest szczególnie niebezpieczny dla substancji PFAS, które charakteryzują się dużą mobilnością i mogą migrować na znaczne odległości od miejsca emisji.

Istotnym źródłem zanieczyszczeń są również ćwiczenia jednostek ochrony przeciwpożarowej. Przez wiele lat podczas szkoleń wykorzystywano piany zawierające fluorowane środki powierzchniowo czynne. Powtarzające się ćwiczenia prowadzone na tych samych poligonach skutkowały stopniowym gromadzeniem się PFAS w glebie oraz wodach podziemnych. Badania prowadzone w Stanach Zjednoczonych, Australii i krajach Europy wykazały podwyższone stężenia tych związków w sąsiedztwie lotnisk oraz wojskowych baz lotniczych, gdzie regularnie stosowano piany AFFF.

Nie można również pominąć awarii instalacji przeciwpożarowych. Uszkodzenia systemów gaśniczych, niekontrolowane uruchomienie instalacji pianowych lub wycieki koncentratów mogą prowadzić do przedostania się znacznych ilości środka pianotwórczego do środowiska nawet bez wystąpienia pożaru.

5. Oddziaływanie środków pianotwórczych na organizmy wodne

Wpływ środków pianotwórczych na organizmy wodne zależy od ich składu chemicznego, stężenia oraz czasu oddziaływania. Szczególnie niebezpieczne są koncentraty pian zawierające fluorowane surfaktanty, jednak również środki bezfluorowe mogą wykazywać toksyczność wobec organizmów wodnych, zwłaszcza w wysokich stężeniach.

Jednym z pierwszych skutków przedostania się środków pianotwórczych do zbiorników wodnych jest pogorszenie parametrów fizykochemicznych wody. Obecność dużych ilości substancji organicznych powoduje wzrost biochemicznego zapotrzebowania na tlen (BZT), co prowadzi do zmniejszenia ilości tlenu rozpuszczonego. Niedobór tlenu ogranicza funkcjonowanie organizmów wodnych i może prowadzić do śnięcia ryb oraz bezkręgowców.

Substancje powierzchniowo czynne zawarte w pianach wpływają również na błony komórkowe organizmów wodnych. Mogą powodować uszkodzenia nabłonka skrzeli ryb,

utrudniając wymianę gazową oraz zaburzając gospodarkę elektrolitową. W efekcie dochodzi do osłabienia organizmów, zmniejszenia zdolności rozrodczych oraz zwiększonej podatności na choroby.

Badania laboratoryjne wykazały, że niektóre składniki pian gaśniczych wykazują toksyczność wobec glonów, rozwielitek (*Daphnia magna*), skorupiaków oraz wielu gatunków ryb. Długotrwałe narażenie nawet na stosunkowo niskie stężenia może powodować zaburzenia wzrostu, rozwoju oraz zachowania organizmów wodnych.

6. PFAS – główne zagrożenie środowiskowe

Największe zainteresowanie naukowców budzą obecnie związki per- i polifluoroalkilowe (PFAS). Są to syntetyczne związki chemiczne zawierające wiązanie węgiel-fluor, które należy do najtrwalszych wiązań występujących w chemii organicznej. Wysoka stabilność chemiczna sprawia, że związki te praktycznie nie ulegają biodegradacji, fotolizie ani hydrolizie.

Do najbardziej znanych przedstawicieli tej grupy należą kwas perfluorooktanowy (PFOA) oraz sulfonian perfluorooktanu (PFOS). Przez wiele lat były one podstawowymi składnikami pian AFFF stosowanych do gaszenia pożarów cieczy palnych.

Po przedostaniu się do środowiska wodnego PFAS mogą utrzymywać się przez dziesiątki lat. Nie ulegają naturalnemu rozkładowi i przemieszczają się wraz z wodami gruntowymi, co prowadzi do rozprzestrzeniania się zanieczyszczenia na znaczne odległości od miejsca emisji.

Charakterystyczną cechą PFAS jest również zdolność do bioakumulacji. Oznacza to, że związki te mogą gromadzić się w organizmach żywych szybciej, niż są z nich usuwane. Zostały wykryte w tkankach ryb, ptaków wodnych, ssaków morskich, a także we krwi ludzi. W kolejnych ogniwach łańcucha pokarmowego ich stężenie może wzrastać, co określa się mianem biomagnifikacji.

7. Skutki zdrowotne związane z narażeniem na PFAS

Choć niniejszy artykuł koncentruje się na wpływie środków pianotwórczych na środowisko wodne, należy podkreślić, że zanieczyszczenie wód może prowadzić również do narażenia ludzi.

Według badań epidemiologicznych oraz ocen prowadzonych przez Europejski Urząd ds. Bezpieczeństwa Żywności (EFSA) i Amerykańską Agencję Ochrony Środowiska (EPA), przewlekła ekspozycja na niektóre związki PFAS może wiązać się z podwyższonym poziomem cholesterolu, zaburzeniami czynności wątroby, osłabieniem odpowiedzi immunologicznej, zmniejszeniem skuteczności szczepień ochronnych oraz zaburzeniami funkcjonowania układu hormonalnego. Badania wskazują również na możliwość zwiększonego ryzyka występowania niektórych nowotworów, zwłaszcza raka nerki i raka jądra, choć zależność ta nadal jest przedmiotem intensywnych badań naukowych.

Z uwagi na możliwość przedostawania się PFAS do ujęć wody pitnej problem ten stał się jednym z najważniejszych wyzwań współczesnej ochrony środowiska. W wielu państwach prowadzone są programy monitoringu jakości wód powierzchniowych i podziemnych, a dopuszczalne poziomy tych substancji są sukcesywnie zaostrzane.

8. Regulacje prawne dotyczące stosowania środków pianotwórczych

Rosnąca liczba badań naukowych dotyczących trwałości oraz toksyczności związków PFAS spowodowała, że w ostatnich latach wiele państw rozpoczęło proces ograniczania stosowania fluorowanych środków pianotwórczych. Szczególne znaczenie mają działania podejmowane przez Unię Europejską, której celem jest stopniowe wyeliminowanie najbardziej niebezpiecznych związków z obrotu oraz ograniczenie ich emisji do środowiska.

Jednym z najważniejszych aktów prawnych jest Rozporządzenie Parlamentu Europejskiego i Rady (WE) nr 1907/2006 (REACH), które reguluje zasady rejestracji, oceny oraz stosowania substancji chemicznych na terenie Unii Europejskiej. W ramach rozporządzenia sukcesywnie wprowadzane są ograniczenia dotyczące wykorzystywania wybranych związków PFAS.

Znaczenie ma również Rozporządzenie Parlamentu Europejskiego i Rady (UE) 2019/1021 w sprawie trwałych zanieczyszczeń organicznych (POP), które wdraża postanowienia Konwencji Sztokholmskiej. Dokument ten ogranicza możliwość stosowania między innymi sulfonianu perfluorooktanu (PFOS), uznawanego za jeden z najbardziej problematycznych składników starszych pian gaśniczych.

Europejska Agencja Chemikaliów (ECHA) prowadzi obecnie działania mające na celu objęcie ograniczeniami całej grupy związków PFAS. Planowane przepisy zakładają znaczne ograniczenie stosowania tych substancji również w środkach pianotwórczych, z wyjątkiem nielicznych zastosowań, dla których nie opracowano jeszcze bezpiecznych zamienników.

W odpowiedzi na zmieniające się przepisy producenci środków gaśniczych intensywnie rozwijają technologie pian bezfluorowych (F3), które zapewniają wysoką skuteczność gaszenia przy znacznie mniejszym ryzyku skażenia środowiska.

9. Ograniczanie wpływu działań gaśniczych na środowisko wodne

Współczesne działania ratowniczo-gaśnicze powinny uwzględniać nie tylko skuteczne ugaszenie pożaru, ale również minimalizację skutków środowiskowych. Zgodnie z zasadami ochrony środowiska istotne jest ograniczenie przedostawania się ścieków popożarowych do zbiorników wodnych.

Podstawowym sposobem ograniczania zanieczyszczeń jest zatrzymywanie wód popożarowych w miejscu prowadzenia działań. W praktyce wykorzystuje się mobilne zapory sorpcyjne, pneumatyczne korki kanalizacyjne, zbiorniki retencyjne oraz tymczasowe wały ziemne. Rozwiązania te pozwalają na zatrzymanie zanieczyszczonych ścieków do czasu ich odpompowania i przekazania do specjalistycznych instalacji zajmujących się oczyszczaniem odpadów ciekłych.

Coraz większe znaczenie ma również właściwe planowanie zabezpieczenia przeciwpożarowego zakładów przemysłowych. Obiekty o zwiększonym ryzyku wystąpienia awarii powinny być wyposażone w systemy retencji ścieków pożarowych oraz urządzenia umożliwiające odcięcie odpływu do kanalizacji deszczowej.

Istotnym kierunkiem działań jest zastępowanie pian zawierających PFAS nowoczesnymi środkami bezfluorowymi. Obecnie wielu producentów oferuje środki pianotwórcze spełniające wymagania dotyczące gaszenia pożarów klasy B bez stosowania fluorowanych środków powierzchniowo czynnych. Choć w niektórych zastosowaniach ich

skuteczność nadal jest przedmiotem badań, postęp technologiczny sprawia, że różnice pomiędzy pianami fluorowanymi i bezfluorowymi systematycznie się zmniejszają.

Ważną rolę odgrywa również szkolenie strażaków. Podczas ćwiczeń coraz częściej stosuje się wodę lub środki szkoleniowe niewywierające negatywnego wpływu na środowisko, ograniczając wykorzystanie rzeczywistych koncentratów pianotwórczych.

10. Wnioski

Środki pianotwórcze pozostają jednym z najskuteczniejszych środków gaśniczych stosowanych podczas pożarów cieczy palnych i substancji ropopochodnych. Ich wykorzystanie wielokrotnie pozwala ograniczyć rozmiary pożaru, skrócić czas prowadzenia działań ratowniczo-gaśniczych oraz zmniejszyć zagrożenie dla życia ludzi.

Jednocześnie wyniki licznych badań naukowych jednoznacznie wskazują, że stosowanie pian zawierających fluorowane środki powierzchniowo czynne może prowadzić do długotrwałego zanieczyszczenia środowiska wodnego. Największe zagrożenie stanowią związki PFAS, które cechują się wyjątkową trwałością, mobilnością oraz zdolnością do bioakumulacji w organizmach żywych.

Współczesna ochrona przeciwpożarowa powinna dążyć do pogodzenia wysokiej skuteczności działań gaśniczych z wymaganiami ochrony środowiska. Osiągnięcie tego celu jest możliwe poprzez stosowanie pian bezfluorowych, budowę systemów retencji ścieków pożarowych, odpowiednie planowanie działań ratowniczych oraz rozwój technologii umożliwiających ograniczenie emisji substancji niebezpiecznych.

Należy podkreślić, że całkowite wyeliminowanie wpływu działań gaśniczych na środowisko nie jest możliwe. Możliwe jest jednak znaczące ograniczenie ryzyka poprzez stosowanie nowoczesnych środków gaśniczych, przestrzeganie obowiązujących przepisów oraz prowadzenie działań zgodnie z zasadami ochrony środowiska.

Bibliografia:

1. Dauchy X., Boiteux V., Bach C., Rosin C., Munoz J.F. (2017). *Per- and polyfluoroalkyl substances in firefighting foam concentrates and water samples collected near sites impacted by the use of these foams*. Chemosphere, 183, 53–61. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2017.05.056>
2. OECD (2021). *Use of Aqueous Film-Forming Foams in Firefighting*. Series on Emission Scenario Documents No. 40. OECD Publishing, Paris. <https://doi.org/10.1787/7a84d2b6-en>
3. OECD (2022). *Fact Cards of Major Groups of Per- and Polyfluoroalkyl Substances (PFASs)*. OECD Publishing, Paris.
4. European Chemicals Agency (ECHA). *Per- and polyfluoroalkyl substances (PFAS)*. Dostęp: <https://echa.europa.eu/en/hot-topics/perfluoroalkyl-chemicals-pfas>.
5. European Food Safety Authority (EFSA). *Per- and polyfluoroalkyl substances (PFAS)*. Dostęp: <https://www.efsa.europa.eu/en/topics/per-and-polyfluoroalkyl-substances-pfas>.
6. United States Environmental Protection Agency (EPA). *Our Current Understanding of the Human Health and Environmental Risks of PFAS*. U.S. EPA.
7. United States Environmental Protection Agency (EPA). *Studying the Breakdown of Fluorine-Free Firefighting Foams and Their Effects on the Environment*. U.S. EPA.

8. Rozporządzenie Parlamentu Europejskiego i Rady (WE) nr 1907/2006 z dnia 18 grudnia 2006 r. w sprawie rejestracji, oceny, udzielania zezwoleń i stosowanych ograniczeń w zakresie chemikaliów (REACH).
9. Rozporządzenie Parlamentu Europejskiego i Rady (UE) 2019/1021 z dnia 20 czerwca 2019 r. dotyczące trwałych zanieczyszczeń organicznych (POP).
10. Commission Regulation (EU) 2025/1988 of 2 October 2025 amending Annex XVII to Regulation (EC) No 1907/2006 as regards per- and polyfluoroalkyl substances in firefighting foams.
11. Buck R.C., Franklin J., Berger U. i in. (2011). *Perfluoroalkyl and Polyfluoroalkyl Substances in the Environment: Terminology, Classification and Origins*. Integrated Environmental Assessment and Management, 7(4), 513–541.
12. Wang Z., DeWitt J.C., Higgins C.P., Cousins I.T. (2017). *A Never-Ending Story of Per- and Polyfluoroalkyl Substances (PFASs)?* Environmental Science & Technology, 51(5), 2508–2518.
13. Kissa E. (2001). *Fluorinated Surfactants and Repellents*. 2nd ed. Marcel Dekker Inc., New York.
14. UNEP (2017). *Technical Guidelines on the Environmentally Sound Management of Wastes Consisting of, Containing or Contaminated with PFOS, PFOA and Related Compounds*.
15. Stockholm Convention on Persistent Organic Pollutants. Text and Annexes.
16. ISO 7203-1:2011. *Fire extinguishing media — Foam concentrates — Part 1: Specification for low expansion foam concentrates for top application to water-immiscible liquids*.
17. ISO 7203-2:2011. *Fire extinguishing media — Foam concentrates — Part 2: Specification for medium expansion foam concentrates*.
18. ISO 7203-3:2011. *Fire extinguishing media — Foam concentrates — Part 3: Specification for high expansion foam concentrates*.
19. National Fire Protection Association. NFPA 11: Standard for Low-, Medium-, and High-Expansion Foam. Latest edition.
20. ITRC (Interstate Technology & Regulatory Council). (2022). *PFAS Technical and Regulatory Guidance Document*.
21. European Commission. *Chemicals Strategy for Sustainability – Towards a Toxic-Free Environment*. Brussels, 2020.
22. Concawe. *Environmental Management of Fire Water*. Report No. 6/19.
23. Postępowanie z wodami pożarowymi – wytyczne OECD dotyczące emisji środków pianotwórczych podczas działań gaśniczych.
24. ECHA. *Restriction of PFAS in Firefighting Foams*. European Chemicals Agency.
25. EFSA Panel on Contaminants in the Food Chain (CONTAM). (2020). *Risk to human health related to the presence of perfluoroalkyl substances in food*. EFSA Journal, 18(9), e06223.

12. „PATOREAKCJA” MATY JAKO MANIFEST AUDIOWIZUALNY. O HYBRYDOWEJ NATURZE I AUTONOMII WSPÓŁCZESNEGO WIDEOKLIPU

Aleksandra Waśniewska

Uniwersytet Wrocławski

Instytut Dziennikarstwa i Komunikacji Społecznej

E-mail: olawasniewska07@gmail.com

1. Wstęp

Współczesny wideoklip muzyczny coraz częściej wykracza poza funkcję wizualnego uzupełnienia utworu muzycznego i narzędzia promocji artysty. Jak zauważa Saul Austerlitz w *Money for Nothing: A History of the Music Video from the Beatles to the White Stripes* [2007], choć teledysk pozostaje związany z funkcją marketingową, jego współczesne realizacje mogą wykorzystywać środki właściwe dla innych form audiowizualnych, tworząc rozbudowane struktury narracyjne i znaczeniowe. Zjawisko to pozwala postrzegać wideoklip jako formę, której znaczenie nie musi być całkowicie podporządkowane warstwie muzycznej. Zgodnie z koncepcją Urszuli Jareckiej wideoklip można ujmować jako polisemiotyczną hybrydę – połączenie muzyki, słowa i obrazu, których współdziałanie prowadzi do powstania nowych jakości znaczeniowych [Jarecka, 2002].

Celem niniejszego artykułu jest analiza sposobów, w jakie hybrydowa forma wideoklipu może prowadzić do powstania względnie autonomicznego komunikatu audiowizualnego. Punktem wyjścia dla rozważań jest teledysk *Patoreakcja* [2021] w wykonaniu rapera Maty (koncepcja kreatywna: Mariusz Stykała; scenariusz: Mariusz Stykała, Maciej Buchwald; reżyseria: Maciej Buchwald. Mariusz Stykała to alter ego Maty). Wybór tego materiału wynika z jego złożonej konstrukcji formalnej oraz nagromadzenia środków wizualnych i odniesień intertekstualnych. Ponad pięciominutowa realizacja łączy między innymi estetykę hip-hopową, elementy surrealizmu, stylizację retro, found footage, choreografię oraz parodię konwencji telewizyjnych. Rozważania te stanowią rozwinięcie analiz, które przeprowadziłam w ramach mojej pracy licencjackiej zatytułowanej *Wideoklip muzyczny jako gatunek hybrydowy*.

Analiza koncentruje się na czterech płaszczyznach: artystycznej formie wyrazu, społecznym wymiarze przedstawienia pokolenia, medialnym wymiarze teledysku oraz jego intertekstualności. Przyjęcie takiego układu pozwala odpowiedzieć na pytanie, w jaki sposób poszczególne elementy *Patoreakcji* współtworzą znaczenie wykraczające poza prostą ilustrację utworu muzycznego.

Szczególne znaczenie ma przy tym relacja pomiędzy hybrydowością a autonomią: zróżnicowanie środków formalnych nie jest bowiem wyłącznie zabiegiem estetycznym, lecz stanowi podstawę konstruowania wielowarstwowej wypowiedzi dotyczącej doświadczeń młodego pokolenia, mechanizmów medialnych oraz pozycji artysty.

2. Sylwetka artysty i kontekst kulturowy

Interpretacja *Patoreakcji* wymaga uwzględnienia kontekstu kulturowego, w którym powstał teledysk, oraz wcześniejszej twórczości jego wykonawcy. Michał Matczak, posługujący się pseudonimem Mata, urodził się 14 lipca 2000 roku we Wrocławiu. Należy do rozpoznawalnych przedstawicieli młodego pokolenia polskich twórców. Jako raper i autor tekstów zyskał popularność dzięki charakterystycznemu sposobowi łączenia osobistej narracji z komentarzem dotyczącym współczesnej rzeczywistości. W 2019 roku wydał singiel *Pato inteligencja*, który stał się szeroko komentowanym zjawiskiem kulturowym. Mata jako pierwszy polski artysta trafił na listę *Billboard Global 200 Excl. US*, a jego utwór *Kiss cam (podryw roku)* [2021] był pierwszą polskojęzyczną piosenką, która znalazła się w tym zestawieniu. Rosnąca rozpoznawalność artysty przełożyła się również na jego współpracę z markami komercyjnymi, między innymi *McDonald's* i *Adidasem* [Maleniuk, 2024].

Teledysk *Patoreakcja*, którego premiera odbyła się 30 marca 2021 roku, stanowi drugą część tzw. „trylogii Pato”. Jego powstanie wiąże się z recepcją *Pato inteligencji* – utworu, który wywołał szeroką debatę dotyczącą doświadczeń młodzieży z tzw. „dobrych domów”. Popularność utworu oraz związane z nią zainteresowanie medialne wpłynęły na sposób funkcjonowania artysty w przestrzeni publicznej. W tym kontekście *Patoreakcja* może być odczytywana jako odpowiedź na wcześniejszą twórczość Maty oraz jako próba przejęcia kontroli nad sposobem konstruowania jego medialnego wizerunku.

Kontekst ten nie stanowi jednak samodzielnego przedmiotu analizy, lecz pozwala lepiej zrozumieć znaczenie wybranych scen i odniesień obecnych w teledysku. Wiele z nich odnosi się bowiem do wcześniejszej twórczości artysty, jego popularności oraz sposobów medialnego przedstawiania jego osoby.

3. Materiał i metody

Materiał badawczy stanowi teledysk *Patoreakcja* w reżyserii Macieja Buchwalda. Analiza opiera się na połączeniu perspektywy semiotycznej z multimodalnym badaniem dyskursu. W ramach przyjętej perspektywy analizowane są wzajemne relacje między poszczególnymi modalnościami komunikatu audiowizualnego, w tym obrazem, tekstem, muzyką, ruchem, scenografią i montażem, oraz sposób, w jaki ich współdziałanie wpływa na konstruowanie znaczeń. Przyjęcie takiego podejścia pozwala traktować teledysk jako złożony system znaków, w którym znaczenie powstaje w wyniku współdziałania obrazu, tekstu i dźwięku. Przedmiotem analizy są zatem zarówno poszczególne elementy warstwy wizualnej, jak i ich relacje z warstwą muzyczną oraz tekstem utworu.

Analiza obejmuje cztery wzajemnie przenikające się płaszczyzny: artystyczną formę wyrazu, społeczny wizerunek pokolenia, medialny wymiar oraz intertekstualność. Podział ten ma charakter porządkujący i nie oznacza, że poszczególne poziomy funkcjonują w teledysku niezależnie. Przeciwnie, ich wzajemne oddziaływanie stanowi jeden z podstawowych elementów jego hybrydowej konstrukcji. Przyjęta perspektywa pozwala również zweryfikować założenie, że *Patoreakcja* nie ogranicza się do ilustrowania warstwy muzycznej. Jeżeli określone obrazy, odniesienia i rozwiązania formalne tworzą znaczenia, których nie można wyprowadzić wyłącznie z tekstu utworu, można mówić o względnej autonomii warstwy audiowizualnej. W tym znaczeniu autonomia nie oznacza całkowitego

uniezależnienia teledysku od muzyki, lecz jego zdolność do współtworzenia odrębnej warstwy narracyjnej i znaczeniowej.

4. Analiza wideoklipu

4.1. Artystyczna forma wyrazu – hybryda estetyk

Jednym z podstawowych elementów konstrukcji *Patoreakcji* jest świadome zestawienie odmiennych estetyk i przestrzeni. Jak wskazuje reżyser Maciej Buchwald [2022], istotnym założeniem realizacyjnym było połączenie dwóch rzeczywistości: klasycznej estetyki rapowo-ulicznej oraz przestrzeni kojarzonej z luksusem. W teledysku pojawiają się surowe „uliczne” ujęcia silnie zakorzenione w kulturze hip-hopowej, które zostają skontrastowane z obrazami luksusowej willi. Mata, ubrany w złoto-czarny szlafrok, gra w ping-ponga sam ze sobą. Zestawienie to można odczytać jako wizualizację napięcia pomiędzy różnymi aspektami wizerunku artysty oraz jego doświadczeniem nagłej popularności.

Hybrydowość formalną wzmacniają fragmenty stylizowane na zapis VHS, zaburzenia obrazu typu glitch oraz wykorzystanie materiałów found footage, między innymi przedstawiających interwencje policji. Materiały te wpisują się również w szerszą narrację twórczości artysty. Teledysk wykorzystuje ponadto rozwiązania kojarzone z estetyką surrealistyczną. Przykładem jest scena, w której twarz Maty pojawia się na powierzchni kafelków po wypłynięciu z pralki. W innej sekwencji artysta zostaje przedstawiony jako postać umieszczona na planszy gry *Monopoly*, zawierającej rzeczywiste nazwy warszawskich ulic.

Zaburzenie realistycznej logiki przedstawienia pojawia się również w scenie z trumną, w której zamknięty w niej raper niespodziewanie wstaje, obsypany konfetti. Zestawienie motywu śmierci z obrazem sukcesu może być interpretowane jako metaforyczne przedstawienie napięcia pomiędzy presją i krytyką a popularnością oraz komercyjnym powodzeniem artysty. Istotne jest przy tym, że znaczenie sceny nie wynika wyłącznie z tekstu utworu, lecz zostaje skonstruowane przez warstwę wizualną.

Kolejnym elementem budującym hybrydowość jest taniec. W teledysku pojawia się grupa tancerzy ubranych w stroje stylizowane na ludowe, zestawione z czerwonymi kominiarkami. Wykonywana przez nich choreografia łączy elementy inspirowane tradycyjnym folklorem z tańcem współczesnym i ruchem charakterystycznym dla hip-hopu. Zestawienie tradycji z nowoczesnością stanowi kolejny przykład łączenia odmiennych kodów kulturowych. Jednocześnie choreografia pozostaje związana z rytmem utworu, przez co warstwa wizualna i muzyczna wzajemnie się uzupełniają.

Analizowane przykłady wskazują zatem, że hybrydowość *Patoreakcji* nie ogranicza się do obecności wielu estetyk. Poszczególne konwencje są ze sobą zestawiane i przekształcane, tworząc własny język wizualny. To właśnie możliwość konstruowania takiego języka stanowi jeden z argumentów na rzecz względnej autonomii teledysku.



Kadr 1. Efekt glitch w teledysku Patoreakcja

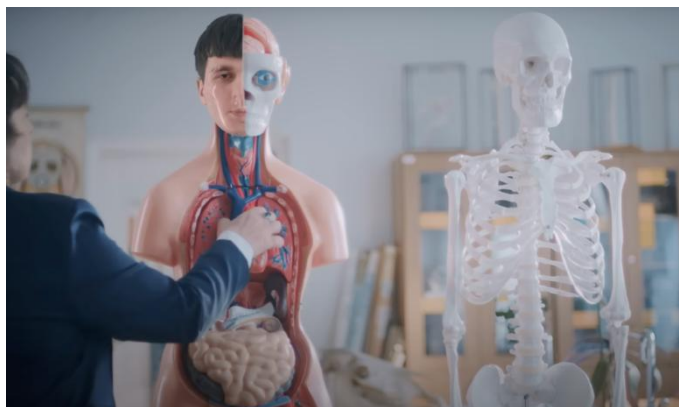
4.2. Społeczny wizerunek pokolenia

Patoreakcja wykorzystuje środki audiowizualne również do konstruowania komentarza dotyczącego doświadczeń młodego pokolenia. Jednym z istotnych motywów jest relacja jednostki z instytucjami i normami społecznymi. Obraz spalonego świadectwa maturalnego oraz zamazanych oczu rapera na fotografii w szkolnym *yearbooku* można interpretować jako symbole dystansowania się od środowiska elitarnego liceum po kontrowersjach związanych z publikacją *Patointeligencji*.

Teledysk wykorzystuje również mechanizm ironicznego odwracania stereotypowych wyobrażeń dotyczących młodzieży. Rozsypany na stole biały proszek, który początkowo może sugerować narkotyki, okazuje się proszkiem do prania. Z kolei odwołanie do popularnego w internecie hasła „pała” wskazuje na dystans wobec przekonania, że szkolne oceny w sposób jednoznaczny determinują późniejszy sukces.

Wielowymiarowy komentarz społeczny pojawia się również w scenie rozgrywającej się w sali biologicznej, w której Mata zostaje przedstawiony jako model anatomiczny. Domniemana nauczycielka pozbawia go wnętrzości, pozostawiając klatkę piersiową, lecz zabierając serce. Scena ta może być interpretowana jako metaforyczne przedstawienie edukacji jako systemu ograniczającego indywidualizm i autonomię jednostki. W tym kontekście Mata przyjmuje pozycję komentatora doświadczeń własnego pokolenia [Pelikan,2024].

Przywołane przykłady pokazują, że warstwa wizualna teledysku nie ogranicza się do przedstawiania jednostkowych doświadczeń artysty. Poszczególne obrazy tworzą szerszy komentarz dotyczący presji społecznej, oczekiwań wobec młodych ludzi oraz napięcia pomiędzy jednostką a instytucjami. Warstwa liryczna pozostaje przy tym w relacji z warstwą wizualną, wzmacniając część przedstawionych znaczeń. *Patoreakcja* może być zatem odczytywana jako próba przekształcenia osobistego doświadczenia artysty w szerszą wypowiedź dotyczącą pokoleniowych doświadczeń.



Kadr 2. Mata jako model anatomiczny w teledysku Patoreakcja

4.3. Medialny wymiar i dekonstrukcja telewizji

Kolejnym poziomem analizy jest sposób przedstawienia mediów oraz mechanizmów konstruowania wizerunku artysty. *Patoreakcja* wykorzystuje język współczesnej kultury medialnej, jednocześnie poddając go przekształceniu i dekonstrukcji. W związku z medialnym zainteresowaniem towarzyszącym *Patointeligencji* w teledysku pojawiają się sceny parodiujące rozpoznawalne formaty telewizyjne.

Przykładem jest pastisz programu śniadaniowego, nawiązujący do *Dzień Dobry TVN*. Mata, odtwarzając gesty kojarzone z występem Toma Cruise’a u Oprah Winfrey, groteskowo skacze po kanapie. Scena ta może być interpretowana jako próba przejęcia kontroli nad medialnym wizerunkiem artysty poprzez świadome wykorzystanie rozpoznawalnej konwencji telewizyjnej. Podobną funkcję pełni scena stylizowana na teleturniej *Familiada*. Najwyżej punktowaną odpowiedzią na tablicy jest słowo „ja”, któremu towarzyszy słyszana w tle fraza: „mój ziomo to ja – błagam, nie mówcie tego mojej mamie”. Odwołanie to nawiązuje bezpośrednio do utworu *Patointeligencja*, wzmacniając autorefleksyjny charakter *Patoreakcji* oraz jej dialog z wcześniejszą twórczością artysty. Przywołanie tego fragmentu w kontekście teleturnieju nadaje mu dodatkowo ironiczny charakter, a jednocześnie pokazuje, w jaki sposób *Patoreakcja* wykorzystuje wcześniejsze teksty Maty do konstruowania nowych znaczeń. Istotnym elementem medialnej warstwy teledysku jest również odniesienie do wykorzystania utworu Maty przez Telewizję Polską w materiale politycznym dotyczącym jego ojca [Chojnacka, 2019]. Kulminacją tego wątku jest scena rozgrywająca się w pałacowym wnętrzu, w której artysta zasiada obok Kuby Wojewódzkiego i wypija kieliszek wody sodowej. Dosłowne przedstawienie tego idiomu prowadzi do groteskowego powiększenia postaci Maty, który niczym King Kong góruje nad Warszawą. Z tej perspektywy kieruje wulgarne słowa pod adresem prezesa stacji. Krytyce mechanizmów medialnych towarzyszy ironiczna dekonstrukcja statusu samego artysty. Mata leży w łóżku otoczony platynowymi płytami i statuetkami, co stanowi nawiązanie do fotografii Roberta Lewandowskiego z trofeami. Scena ta pozwala zestawić medialny obraz sukcesu z jego świadomym przerysowaniem.

W tym ujęciu *Patoreakcja* wykorzystuje język popkultury do konstruowania kontrnarracji wobec sposobów medialnego przedstawiania artysty. Szczególnie istotne jest to, że teledysk nie pozostaje wyłącznie przedmiotem medialnej reprezentacji, lecz sam komentuje mechanizmy tej reprezentacji. W ten sposób warstwa audiowizualna uzyskuje

funkcję metamedialną, a teledysk staje się narzędziem komentowania własnego funkcjonowania w przestrzeni medialnej.



Kadr 3. Mata wraz z przyjaciółmi w programie stylizowanym na Familiadę

4.4. Intertekstualność – wideoklip jako przestrzeń przetwarzania tekstów kultury

O znaczeniowej złożoności *Patoreakcji* świadczy również nagromadzenie odniesień intertekstualnych. Poszczególne obrazy odsyłają do różnorodnych tekstów kultury – od historii i sztuki wysokiej po kulturę popularną i internetową. *Patoreakcja* przypomina pod tym względem strukturę hipertekstową, w której odmienne kody kulturowe zostają zestawione w ramach jednego komunikatu audiowizualnego.

Otwarcie teledysku nawiązuje do historycznej wizyty Michaela Jacksona w Liceum im. Batorego w 1997 roku. Na bramie szkoły pojawia się list gończy z liczbą 33, będącą symbolem liczbowym związanym z Matą oraz napisem „Wanted deaf or alive”, nawiązującym do znanego westernowego sformułowania „Wanted dead or alive”. Zestawienie tych elementów można interpretować jako metaforyczne odniesienie do utraty słuchu, a tym samym do wizji artystycznej „śmierci” muzyka.

Wideoklip wykorzystuje również odniesienia do polskiego malarstwa historycznego. Mata rozdziera ubranie, przyjmując pozę nawiązującą do obrazu *Rejtan – Upadek Polski* Jana Matejki. W kontekście narracji teledysku odniesienie to można odczytać jako wizualizację buntu i sprzeciwu. W innej scenie artysta wciela się w postać Stańczyka. Zestawienie tych odniesień z estetyką hip-hopową pokazuje sposób, w jaki teledysk łączy elementy tradycji kulturowej z kodami współczesnej kultury popularnej.

Odniesienia intertekstualne obejmują także kulturę internetową. Dokument *Licentia Poetica*, przedstawiający twórcę jako osobę chronioną przed konsekwencjami prawnymi jego tekstów, stanowi bezpośrednią parodię popularnego w internecie dokumentu dotyczącego kibica posługującego się pseudonimem „Tumulec” [Witoszka, 2024]. Kolejne obrazy wykorzystują metafory związane z sukcesem – Mata pojawia się jako himalaista zdobywający zimną K2 oraz jako kosmonauta wbijający flagę na Księżycu. Ostatnie wersy, w których artysta deklaruje, że „pozamiatał” (follow-up do utworu *100 dni do matury*, w którym padł

wers: „Zara pozamiatam jo!”), zamykają tę konstrukcję, zestawiając pejoratywne określenie „pato” z naukowym terminem „reakcja”.

Nagromadzenie intertekstualnych odniesień sprawia, że znaczenie *Patoreakcji* nie wyczerpuje się w pojedynczym odczytaniu. Rozpoznanie poszczególnych odniesień wpływa na sposób interpretowania scen, a ich zestawienie pozwala konstruować znaczenia niewynikające bezpośrednio z warstwy muzycznej. Wideoklip łączy przy tym odległe obszary kultury – historię, malarstwo, telewizję, kulturę internetową i hip-hop – przekształcając je w elementy jednego komunikatu.

Intertekstualność stanowi tym samym kolejny wymiar autonomii *Patoreakcji*. Teledysk nie tylko ilustruje treść utworu, lecz wykorzystuje własny język wizualny do prowadzenia dialogu z innymi tekstami kultury. Odbiorca otrzymuje więc komunikat, którego pełne odczytanie wymaga rozpoznania relacji pomiędzy wieloma kodami kulturowymi.



Kadr 4. Mata przyjmujący pozę Rejtana w teledysku *Patoreakcja*

5. Podsumowanie

Przeprowadzona analiza *Patoreakcji* wskazuje, że współczesny wideoklip może funkcjonować jako wielowarstwowy i względnie autonomiczny tekst kultury. Analizowany teledysk w reżyserii Macieja Buchwalda łączy zróżnicowane środki wizualne, konwencje artystyczne oraz odniesienia intertekstualne, tworząc komunikat, którego znaczenie nie ogranicza się do funkcji ilustracyjnej. Zgodnie z koncepcją Urszuli Jareckiej [1999] oraz ustaleniami Michała Picka [2024] można go postrzegać jako wielowarstwowy komunikat audiowizualny, w którym obraz, słowo i dźwięk współtworzą znaczenie.

Hybrydowość *Patoreakcji* ujawnia się na kilku wzajemnie powiązanych poziomach. W warstwie formalnej teledysk łączy współczesne techniki cyfrowe z estetyką VHS, elementami surrealistycznymi oraz found footage. Wykorzystuje także elementy tańca, filmu i performansu. Na poziomie treściowym łączy komentarz dotyczący doświadczeń młodego pokolenia z krytyką mechanizmów medialnych oraz rozbudowaną siecią odniesień intertekstualnych. Hybrydowość nie pełni więc jedynie funkcji estetycznej – staje się sposobem organizowania znaczenia.

Analiza wskazuje również, że autonomia *Patoreakcji* ma charakter względny. Teledysk pozostaje związany z utworem muzycznym, jednak nie ogranicza się do jego wizualnego uzupełnienia. Tworzy własne metafory, wykorzystuje rozpoznawalne konwencje

kulturowe, komentuje mechanizmy medialne oraz prowadzi dialog z innymi tekstami kultury. W rezultacie warstwa audiowizualna może być traktowana jako odrębny poziom komunikacji, który pozostaje w relacji z muzyką, ale nie jest jej całkowicie podporządkowany.

Na podstawie analizowanego przypadku można zatem stwierdzić, że współczesny wideoklip może funkcjonować jako autonomiczny tekst audiowizualny. *Patoreakcja* stanowi szczególnie wyrazisty przykład takiej praktyki: łączy różnorodne estetyki, kody kulturowe i strategie medialne, przekształcając je w spójną wypowiedź dotyczącą artysty, jego pokolenia oraz sposobów funkcjonowania w kulturze popularnej. W tym sensie hybrydowość i autonomia nie są odrębnymi właściwościami dzieła, lecz pozostają ze sobą ściśle związane – wielość wykorzystanych kodów umożliwia bowiem stworzenie komunikatu wykraczającego poza funkcję ilustracyjną.

Bibliografia:

1. Austerlitz S. (2007). *Money for Nothing: A History of the Music Video, from the Beatles to the White Stripes*. New York: Continuum.
2. Jarecka U. (1999). *Świat wideoklipu*. Warszawa: Oficyna Naukowa.
3. Jarecka U. (2002). Od teledysku do wideoklipu. W: M. Hopfinger (red.), *Nowe media w komunikacji społecznej XX wieku*, Warszawa: Oficyna Naukowa.
4. Pick M. (2024). *Wideoklip. Od Beatlesów po AI videos – pejzaż gatunku ewoluującego*. Bydgoszcz: Wydawnictwo Uniwersytetu Kazimierza Wielkiego.

Wykaz stron internetowych

5. Buchwald M. *Jak powstawała „Patoreakcja” – case study teledysku Maty – PL MVA warsztaty*. YouTube: https://www.youtube.com/watch?v=hv0xRCCO_fY [dostęp: 07.08.2026].
6. Chojnacka J. (2019). „*Patointeligencja*” Maty wykorzystana w materiale *Wiadomości TVP [WIDEO]*. Antyradio: <https://www.antyradio.pl/news/Patointeligencja-Maty-wykorzystana-w-materiale-Wiadomosci-TVP-WIDEO-37739> [dostęp: 02.08.2026].
7. Mata. *Kiss cam* (podryw roku). YouTube: <https://www.youtube.com/watch?v=z9HsSzoRT1Y>.
8. Mata. *Patointeligencja*. YouTube: <https://www.youtube.com/watch?v=wTAibxp37vE>.
9. Mata. *Patoreakcja*. YouTube: <https://www.youtube.com/watch?v=t4O1LLk6qlY>.
10. Maleniuk W. *Premiera butów adidas zaprojektowanych przez Matę*. Vogue Polska: <https://www.vogue.pl/a/relacja-z-premiery-adidas-campus-00s-x-mata> [dostęp: 07.08.2026].
11. Pelikan N. *Rapowy głos pokolenia Z — sylwetka Michała Matczaka*. PDF.edu.pl: <https://pdf.edu.pl/nadiapelikan/bez-kategorii/sylwetka-michala-matczaka> [dostęp: 09.08.2026].
12. Witoszka B. *Najsłynniejszy Polak internetu. Kamil Adrian Tumulec obchodzi urodziny*. Komputer Świat: <https://www.komputerswiat.pl/aktualnosci/internet/najslynniejszy-dowod-osobisty-internetu-kamil-tumulec-obchodzi-urodziny/995b4lz> [dostęp: 09.08.2026].
13. Zdjęcie Roberta Lewandowskiego na platformie Instagram: https://www.instagram.com/p/CJdGbCohrcx/?utm_source=igembed

Źródło ilustracji

14. Kadry zamieszczone w artykule pochodzą z:

15. Mata. *Patoreakcja*. YouTube: <https://www.youtube.com/watch?v=t4O1LLk6qlY>.

13. WPLYW MECHANIZMÓW GRYWALIZACJI I NA ZAANGAŻOWANIE I PROCES DECYZYJNY KONSUMENTÓW W BRANŻY E-COMMERCE

Martyna Zemla

Uniwersytet Ekonomiczny w Krakowie

E-mail: martyna_zemla@o2.pl

1. Wstęp

Rynek e-commerce jest niezwykle konkurencyjnym środowiskiem, w którym jeszcze kilka lat temu przyciągnięcie klienta było proste - wystarczała technicznie dopracowana strona, przejrzysty interfejs i strategia SEO. Dziś taka strategia to standard, uwaga użytkownika w internecie jest krótsza niż kiedykolwiek. Sklepy internetowe mierzą się z rosnącym współczynnikiem odrzuceń i mniejszym ruchem na stronie, spowodowanym szybkimi odpowiedziami sztucznej inteligencji. Mierzą się także z trudnością w budowaniu długotrwałych relacji z kupującymi. Marki muszą zaproponować coś więcej niż tradycyjny rabat, żeby zatrzymać użytkownika na ich stronie. Odpowiedzią na ten problem stała się grywalizacja - nowy sposób na zaangażowanie odbiorców.

Są to mechanizmy, które są doskonale znane z gier - zbieranie punktów, odblokowywanie kolejnych poziomów czy codzienne wyzwania. Elementy te na stałe wpisały się w cyfrowy marketing. Mają jeden ważny cel: sprawić, aby proces zakupowy przestał być samą transakcją, a stał się wciągającym doświadczeniem. Celem niniejszej pracy jest przeanalizowanie w jaki sposób elementy grywalizacji wpływają na zachowania i proces zakupowy konsumentów.

2. Teoretyczne podstawy grywalizacji i psychologii konsumenta

Nieograniczony dostęp do produktów oraz usług z całego świata sprawia, że tradycyjne metody przyciągania uwagi, takie jak obniżki cen czy darmowa dostawa, stały się standardem. Z tego powodu marki zaczęły szukać nowych sposobów na budowanie relacji z klientem. Przedsiębiorstwa zaczęły więc sięgać po narzędzia, które angażują przede wszystkim emocje użytkownika. Jednym z tych skutecznych narzędzi okazała się grywalizacja.

2.1. Definicja i istota grywalizacji

Według Deterding i jego współautorów (2011) grywalizacja (gamifikacja) to wykorzystanie elementów projektowania gier w kontekstach niezwiązanych bezpośrednio z graniem. Pozwala to odróżnić grywalizację od gry i marketingu promocji. Proces zakupowy zostaje wzbogacony o elementy przynoszące rozrywkę. Może to pomóc przy zmianach zachowania użytkownika.

Warto powiedzieć o różnicy systemu lojalnościowego i grywalizacji. Obie te metody mają za zadanie angażować klienta i zachęcać potencjalnych konsumentów do głębszej relacji

z marką. Jednak system lojalnościowy zwykle opiera się na zbieraniu punktów i wymienianiu ich na rabaty oraz inne korzyści (Berman, 2006). System grywalizacji wprowadza elementy rozrywki, może polegać na specjalnych zadaniach, osiągnięciu wymaganego poziomu, który przyniesie korzyści czy też wprowadza rywalizację. Pozwala na zbudowanie relacji i czerpanie satysfakcji z samej interakcji z marką.

Grywalizacja nie jest więc synonimem tradycyjnego programu lojalnościowego, jednak pojęcia te nie są całkowicie rozłączne. Gamifikacja może bowiem stanowić sposób zaprojektowania programu lojalnościowego poprzez wzbogacenie go o elementy charakterystyczne dla gier. (Hwang i Choi, 2020; Rakhmanita i in., 2023)

2.2. Psychologiczne fundamenty motywacji - Teoria Autodeterminacji

Teoria autodeterminacji, która jest określana również jako Self-Determination Theory - SDT- może wyjaśnić skuteczność grywalizacji. Richard M. Ryan i Edward L. Deci (2000) wskazują, że motywacja nie jest zjawiskiem jednorodnym i znaczenie ma przyczyna podejmowania określonego działania. Użytkownik może wykonywać daną czynność dlatego, że uważa ją za interesującą i satysfakcjonującą albo dlatego, że oczekuje konkretnej nagrody, chce uniknąć straty lub odczuwa presję zewnętrzną. Teoria SDT rozróżnia zatem motywację wewnętrzną i zewnętrzną. Podkreśla także, że poszczególne formy motywacji zewnętrznej mogą różnić się stopniem autonomii użytkownika.

Motywacja wewnętrzna występuje, gdy dane działanie jest podejmowane ze względu na satysfakcję wynikającą z samej aktywności i chęci doświadczania nowych wyzwań. W kontekście grywalizacji może być związana z przyjemnością uczestniczenia w zadaniach, obserwowania własnych postępów lub odkrywania nowych elementów aplikacji czy strony internetowej. Regularne wykonywanie zadań w aplikacji nie tylko w celu uzyskania zniżek, ale także dlatego, że użytkownik traktuje je jako ciekawe doświadczenie.

Motywacja zewnętrzna odnosi się do wykonywania aktywności w celu uzyskania pewnej korzyści. Zniżka, darmowe punkty, dostęp do limitowanej oferty mogą być taką korzyścią w e-commerce.

Z perspektywy Teorii Autodeterminacji skuteczność gamifikacji zależy od zaspokojenia potrzeb psychologicznych takich jak: autonomii, kompetencji oraz relacyjność. Autonomia oznacza możliwość wyboru i poczucie dobrowolności, kompetencja - obserwowanie postępów, a relacyjność - poczucie przynależności i budowania więzi. W e-commerce potrzeby te mogą być wspierane przez wybór zadań, poziomy, wyzwania społeczne i nagrody. Z drugiej strony narzucone cele, krótkie terminy i nagrody uzależnione od wykonywania konkretnego działania mogą osłabiać motywację. Punkty i inne nagrody mogą zwiększać krótkoterminową aktywność użytkownika, ale niekoniecznie prowadzą do trwałego przywiązania do marki. Pozostawienie konsumentowi wyboru i umożliwienie obserwowania własnych postępów ma znacznie większe znaczenie. (Ryan i Deci, 2000)

Gamifikacja w e-commerce powoli odchodzi od prostych nagród na rzecz bardziej złożonych doświadczeń, które mają zapewnić poczucie zadowolenia, poznawania i budowanie więzi społecznej. (Bogoslov i in., 2023) Bogoslov i współautorzy (2023) również podkreślają znaczenie personalizacji systemów, zadań i nagród. Niedopasowane rozwiązania mogą spowodować frustrację i przynosić krótkotrwałe rezultaty.

Długa i skuteczna strategia z wykorzystaniem grywalizacji nie zależy wyłącznie od liczby punktów i wysokości rabatów. Bardziej trwale zaangażowanie może powstać, gdy firma połączy korzyści materialne z możliwością wyboru, widocznym postępowaniem i poczuciem przynależności do społeczności. Tak zaprojektowany system grywalizacji ma większą szansę na regularne korzystanie z platformy i budowanie relacji użytkownika z marką.

2.3. Zjawisko FOMO w systemach nagród i mechanizmach grywalizacyjnych

Fear of Missing Out czyli FOMO, jest zjawiskiem psychologicznym związanym z obawą, że dana osoba traci możliwość uczestnictwa w ważnych doświadczeniach. Autorzy raportu „FOMO. Polacy a lęk przed odłączeniem” (Jupowicz-Ginalska i in., 2018) proponują tłumaczenie tego terminu jako „strach przed odłączeniem”, podkreślając jego związek z ciągłą obecnością użytkowników w Internecie. Zgodnie z definicją Andrew K. Przybylskiego (2013) i autorów FOMO oznacza „wszechogarniający lęk, że inne osoby w danym momencie przeżywają bardzo satysfakcjonujące doświadczenia, w których ja nie uczestniczę”. Zjawisku towarzyszą takie potrzeby jak potrzeba pozostawania w stałym kontakcie z innymi oraz regularnego sprawdzania, co robią znajomi lub członkowie określonej społeczności.

Polskie badanie FOMO przeprowadzono w marcu 2018 roku metodą CAWI na ogólnopolskiej próbie 1060 internautów w wieku co najmniej 15 lat. Struktura próby uwzględniała płeć, wiek i wielkość miejsca zamieszkania. Należy zaznaczyć, że badanie miało charakter ankietowy i przekrojowy. Pozwala więc wskazywać związki pomiędzy poziomem FOMO a zachowaniami osób korzystających z social mediów, ale nie umożliwia jednoznacznego stwierdzenia, że FOMO jest bezpośrednią przyczyną określonych zachowań.

Badania wykazały, że osoby z wysokim FOMO korzystały z mediów społecznościowych znacznie intensywniej. 69% badanych z wysokim FOMO korzystało z mediów społecznościowych w sytuacji nudy lub w celu poprawienia humoru, a 65% traktowało je jako sposób ucieczki od codzienności. Osoby te poszukują informacji i wykorzystują social media do regulowania emocji, poszukiwania rozrywki i utrzymania poczucia przynależności czy uczestnictwa.

Obecnie wiele osób korzysta z social mediów i Internetu, a zjawisko FOMO najbardziej dotyka właśnie te osoby. Chociaż samo badanie nie analizowało bezpośrednio sklepów internetowych czy aplikacji, to wyniki raportu można odnieść do grywalizacji i mechanizmów stosowanych w e-commerce. Zbierane punkty, osiągnięcia, codzienne logowanie, limitowane nagrody, specjalne wydarzenia mogą wywołać obawę przed utratą korzyści, których doświadczają inne osoby. Użytkownik może powracać do aplikacji ze względu na to, że nie chce stracić postępu lub nie chce zostać wykluczonym z wydarzenia ograniczonego czasowo. Konsumenci widząc swoje wyniki w rankingach mogą porównywać się z innymi użytkownikami i potęgować obawę w bardziej konkretny lęk np. przed utratą punktów, statusu lub okazji promocyjnej itp.

FOMO może spowodować, że konsumenci będą częściej otwierać aplikację i wchodzić w interakcje z nią, co może skłaniać do szybszego podejmowania decyzji zakupowych. Nie oznacza to jednak automatycznego budowania trwałej lojalności.

Autorzy raportu zauważyli, że brak telefonu lub powiadomień wywoływał dyskomfort osobom, które mają wysoki poziom FOMO. Warto dodać, że połowa tych osób przyznała, że korzysta z mediów społecznościowych dłużej niż planowała, a nawet część z nich (36%)

uważała, że korzystanie z tych platform przybierało formę uzależnienia. Dlatego wykorzystywanie FOMO w grywalizacji może poprawiać krótkoterminowe wskaźniki zaangażowania i konwersji, ale ta strategia rodzi ryzyko przeciążenia i negatywnej oceny marki. Z etycznego punktu widzenia mechanizmy ograniczeń czasowych powinny wspierać atrakcyjność doświadczeń, a nie opierać się na presji i lęku.

3. Praktyczne zastosowanie grywalizacji w e-commerce - analiza przypadków

3.1. Motywacja i zaangażowanie w praktyce - systemy grywalizacyjne w strategii marki Rossmann

Rossmann wykorzystuje aplikację mobilną do prezentowania promocji, obsługi zakupów, ale także do angażowania konsumentów poprzez wyzwania i interaktywne akcje. Przykładami takich interakcji są „Strefa Czułości”, „Zdmuchnij pianę”, „Kupon za uśmiech” i Rossmann Run.

Strefa Czułości w aplikacji jest poświęcona dobrostanowi i trosce o siebie. Oferuje ćwiczenia oddechowe, dziennik emocji i praktyki związane z odpoczynkiem oraz wyciszeniem. Głównym elementem tego modułu są wyzwania, które polegają na wykonywaniu wybranej czynności przez kilka kolejnych dni. Użytkownik wybiera zadanie, np. spacer bez telefonu lub inną formę dbania o siebie. Po wykonaniu wyzwania otrzymuje informację o zaliczeniu i nalicza się postęp. (Wirtualne Kosmetyki, 2026)

Mechanizm ten wykorzystuje serię, czyli konieczność regularnego wykonywania co najmniej jednego zadania dziennie. Pominięcie dnia powoduje rozpoczęcie serii od początku. Możliwość wyboru aktywności wspiera poczucie autonomii, natomiast obserwowanie postępu może wzmacniać poczucie kompetencji. System łączy motywację wewnętrzną, wynikającą z troski o dobrostan, z motywacją zewnętrzną w postaci nagrody, którą może być produkt, kupon rabatowy lub karta podarunkowa.

Konstrukcja Strefy Czułości może także wywołać presję do regularnego powracania do aplikacji. Utrata serii i ograniczona liczba nagród mogą prowadzić do obawy przed utratą korzyści. System ten jest przykładem grywalizacji opartej na budowaniu nawyku i wizualizacji postępów.

Kolejną akcją w aplikacji jest Zdmuchnij Pianę, w której uczestnik za pomocą mikrofonu telefonu usuwa wirtualną pianę i odkrywa niespodziankę. Nagrodami mogą być kupony rabatowe, upominki oraz kody do usług partnerów. Użytkownik może odkryć tylko jedną niespodziankę dziennie. W tym przypadku mechanizm opiera się na elemencie zaskoczenia, ciekawości i ograniczeniu czasowym. Brak wiedzy o rodzaju nagrody zachęca do otwierania aplikacji, co może też doprowadzić użytkownika do przeglądnięcia oferty i dokonania zakupu.

Kolejnym przykładem jest Rossmann Run, który łączy świat wirtualny z rzeczywistą aktywnością fizyczną. Rossmann Run to oparta na grywalizacji akcja promocyjna, w której użytkownicy aplikacji mobilnej biegają w wybranym przez siebie miejscu i czasie, a pokonany przez nich rzeczywisty dystans jest automatycznie przeliczany na rosnące zniżki na zakupy. Każdy pełny kilometr oznaczał 5% rabatu, a pokonanie 10 kilometrów pozwalało uzyskać kupon o wartości 50%. System wykorzystywał typowe elementy grywalizacji: jasno

określone zadanie, mierzalny wynik, informację zwrotną, obserwowanie postępu oraz nagrodę rosnącą wraz z osiągnięciem.

Rossmann Run łączył motywację wewnętrzną, związaną z aktywnością fizyczną i poczuciem osiągnięcia celu oraz z motywacją zewnętrzną w postaci rabatu. Ważny był także wymiar społeczny, ponieważ środki z wpisowego przekazano Polskiemu Komitetowi Paralimpijskiemu. (Rossmann, 2026)

Skala wydarzenia była ogromna. 600 tys. dostępnych miejsc zostało zajętych w ciągu 36 godzin, a w biegu uczestniczyły 525 172 osoby. Łącznie pokonały one ponad 5,1 mln kilometrów, a średni dystans wyniósł 9,8 kilometra. Charytatywny bieg zebrał ponad 3,4 mln zł. Ograniczona liczba miejsc mogła dodatkowo uruchamiać mechanizm FOMO i skłaniać użytkowników do szybkiej rejestracji. (Rossmann, 2026)

Rossmann Run należy jednak uznać przede wszystkim za przykład grywalizacji omnichannel, ponieważ aktywność rozpoczynała się w aplikacji, lecz kupon z edycji 2026 można było wykorzystać wyłącznie w sklepach stacjonarnych. Jednak brak danych dotyczących wykorzystania kuponów i wartości nie pozwala na ocenienie wpływu wydarzenia na sprzedaż oraz długoterminową lojalność klientów.

Przedstawione działania wykorzystują różne mechanizmy psychologiczne. Strefa Czułości opiera się na regularności, wyborze zadań i utrzymywaniu serii, Zdmuchnij Pianę wykorzystuje ciekawość i nagrodę, natomiast Rossmann Run łączy osiągnięcie mierzalnego celu z rabatem. We wszystkich aktywnościach aplikacja mobilna Rossmann staje się dodatkowym punktem kontaktu z marką, który zachęca do regularnych powrotów. Jednak bez danych sprzedażowych nie można stwierdzić, że zwiększona aktywność użytkowników w aplikacji automatycznie prowadzi do wzrostu lojalności i wartości zakupów.

Przykład Rossmanna odzwierciedla opisane przez Bogoslov i współautorów (2023) przejście od statycznych programów promocyjnych do dynamicznych i aktywizujących doświadczeń. Marka stosuje zarówno zewnętrzne korzyści ekonomiczne, takie jak rabaty i kupony, jak i elementy odnoszące się do satysfakcji, dobrostanu, osiągnięć oraz uczestnictwa w inicjatywach społecznych.

3.2. Wpływ odznak na aktywność transakcyjną użytkowników Sharetribe

Hamari (2017) przeprowadził dwuletnie badanie terenowe na platformie Sharetribe, będącej internetowym serwisem umożliwiającym użytkownikom publikowanie ofert oraz zawieranie transakcji typu peer-to-peer. W tym badaniu porównano dwie grupy klientów: 1410 osób, które zarejestrowały się w ciągu roku przed wdrożeniem odznak oraz 1579 osób zarejestrowanych w ciągu roku po ich wprowadzeniu. Aktywność tych grup obserwowano przez taki sam okres czasu, a analiza obejmowała liczbę opublikowanych ofert, zaakceptowanych transakcji, komentarzy i wyświetleń stron witryny.

Porównanie wyników wykazało, że po wdrożeniu grywalizacji średnia liczba ofert przypadających na użytkownika wzrosła z 0,45 do 0,84, natomiast liczba zaakceptowanych transakcji z 0,09 do 0,41. Wzrosła także liczba komentarzy, z 0,09 do 0,48 i odsłon stron, z około 45 do ponad 83. Różnice były istotne statystycznie. Autorzy uwzględniając długość korzystania z serwisu i wzrost liczby jego użytkowników stwierdzili, że dodatni efekt utrzymał się w przypadku transakcji, komentarzy i wyświetleń. Zależność dotycząca liczby publikowanych ofert przestała być jednak istotna statystycznie.

Odnaki mogły zwiększać ogólną aktywność i skłonność do finalizowania wymiany. Użytkownicy, którzy korzystali z nowej wersji platformy, która zawierała odnaki, częściej przeglądali jej zawartość, komentowali ogłoszenia i co najważniejsze - przeprowadzali transakcje.

Wyniki badań należy jednak interpretować ostrożnie, ponieważ badanie dotyczyło społeczności Sharetribe, której około 90% użytkowników stanowili studenci, a pozostali byli pracownikami uczelni. Autor informuje, że nie dysponował pełnymi danymi demograficznymi, dlatego też wyników nie można bezpośrednio uogólniać. Należy również pamiętać o nowych rejestracjach, które stale napływały i mogły zwiększać liczbę możliwych interakcji i czynnikach zewnętrznych. Publikacja mierzyła liczbę transakcji, a nie ich wartość czy przychody platformy. Wyniki mogą więc sugerować, że odnaki przyczyniły się do zwiększenia liczby zaakceptowanych transakcji.

3.3. Wpływ grywalizacji na aktywność użytkowników i wyniki sprzedażowe

Farace i współautorzy (2025) przeanalizowali dane pochodzące od dużego europejskiego sprzedawcy internetowego oferującego artykuły gospodarstwa domowego, elektronikę oraz produkty spożywcze. Próba obejmowała 4896 użytkowników, których aktywność obserwowano przez około dwa lata, od maja 2012 do lipca 2014 roku.

Przeciętny uczestnik korzystał z programu przez ponad rok. Autorzy badali cztery wskaźniki: czas pomiędzy zakupami, częstotliwość transakcji, średnią wartość pojedynczego zakupu oraz całkowitą wartość wydatków klienta.

Badanie zostało oparte na rzeczywistych danych dotyczących zachowań i transakcji, a nie na deklaracjach respondentów. Zastosowano metodę propensity score matching, która umożliwiła porównanie klientów podejmujących określone aktywności z podobnymi użytkownikami, którzy w nich nie uczestniczyli. Rozwiązanie to miało ograniczyć problem samoselekcji, wynikający z tego, że osoby bardziej aktywne lub lojalne mogą być jednocześnie bardziej skłonne do udziału w grywalizacji.

Liczba zdobytych odznak nie prowadziła automatycznie do istotnego wzrostu przychodów. Wyniki pokazują, że efekty zależały od konkretnego rodzaju nagradzanej aktywności. Zapisanie się do newslettera skracało czas do kolejnego zakupu o około 20 dni, a napisanie recenzji produktu o około 31 dni. Działania te przyspieszały więc powrót klienta, ale nie zwiększały wartości pojedynczego zakupu ani jego całkowitych wydatków.

Działania o charakterze społecznym przyniosły najkorzystniejsze rezultaty. Polubienie treści było związane ze wzrostem wartości pojedynczego zakupu o 8,95 euro i całkowitych wydatków klienta o 17,49 euro. Natomiast udostępnianie treści spowodowało wzrost wartości zakupu o 9,51 euro i całkowitych wydatków o 26,07 euro. Wpływ udostępniania na łączną wartość wydatków osiągnął wyższy poziom istotności statystycznej niż pozostałe wyniki. Oznacza to, że aktywności zwiększające społeczną widoczność i kontakt między użytkownikami mogą mieć większe znaczenie sprzedażowe niż działania wykonywane na potrzeby indywidualnego klienta.

Nie wszystkie elementy tego systemu przyniosły pozytywne rezultaty. Dodawanie produktów do listy życzeń w celu zdobycia punktów wiązało się z obniżeniem częstotliwości zakupów o 0,16 transakcji oraz zmniejszeniem średniej wartości zakupu o 13,16 euro. Autorzy twierdzą, że nagradzanie samego zapisywania produktów mogło skłaniać do

wykonywania działań bez rzeczywistego zamiaru zakupu. Przypadek ten pokazuje, że mechanizm grywalizacyjny może zwiększać liczbę interakcji z platformą, ale nie musi prowadzić do konwersji sprzedażowej.

Wyniki badania potwierdzają, że grywalizacja może wpływać na wydatki i częstotliwość powrotów klientów, ale efekt zależy od zachowania, które zostaje nagrodzone. Wartościowe okazały się działania społeczne, natomiast aktywności takie jak dodawanie produktów do listy życzeń, nie zwiększały sprzedaży. Oznacza to, że przedsiębiorstwo powinno analizować każdy element programu i przypisywać mu konkretnych wskaźników takich jak czas do kolejnego zakupu, częstotliwość transakcji czy średnia wartość koszyka.

Badanie ma pewne ograniczenia. Dane pochodziły od tylko jednego europejskiego sprzedawcy, dlatego rezultatów nie można uogólniać na wszystkie branże i rynki. Choć wykorzystana metoda statystyczna zminimalizowała wpływ samoselekcji, nie pozwoliła w pełni wykluczyć sytuacji, w której to właśnie wyjściowe zaangażowanie klientów bezpośrednio determinowało ich chęć do udziału w konkretnych aktywnościach. Wyniki więc należy interpretować jako dowód związku pomiędzy wybranymi działaniami grywalizacyjnymi a rezultatami zakupowymi, a nie jako jednoznaczne potwierdzenie, że każdy program grywalizacyjny spowoduje wzrost sprzedaży.

Wyniki badania europejskiego sprzedawcy pozwalają zaobserwować mechanizmy, które mogą wynikać z omawianych wcześniej zjawisk psychologicznych. Wzrost wydatków przy działaniach społecznych dobrze współgra z potrzebą relacyjności, podczas gdy szybsze powroty klientów z newslettera wpisują się w charakterystykę FOMO. Jednocześnie przypadek listy życzeń stanowi cenną wskazówkę, że nadużywanie motywacji zewnętrznej nie zawsze musi prowadzić do zwiększenia konwersji sprzedażowej.

4. Podsumowanie

Przeprowadzona analiza mechanizmów grywalizacji w branży e-commerce prowadzi do wniosku, że skuteczność tego narzędzia w budowaniu zaangażowania i napędzaniu sprzedaży zależy przede wszystkim od precyzyjnego dopasowania działań do psychologicznych potrzeb konsumenta. Strategia wykorzystania gamifikacji zmieniła się i przestała być jedynie dodatkiem opartym na prostym zbieraniu punktów, stając się strategicznym sposobem na tworzenie immersyjnych doświadczeń zakupowych.

Z perspektywy teoretycznej najsilniejsze i najtrwalsze przywiązanie do marki budują systemy oparte na motywacji wewnętrznej. Zaspokojenie zdefiniowanych w Teorii Autodeterminacji potrzeb autonomii, kompetencji i relacyjności pozwala przekształcić rutynową transakcję w satysfakcjonującą interakcję. Z kolei mechanizmy bazujące na zjawisku FOMO, choć bardzo efektywne w krótkoterminowym przyspieszaniu decyzji zakupowych, niosą ze sobą ryzyko przeciążenia konsumenta.

Analiza rynkowych studiów przypadku stanowi potwierdzenie tych założeń. Sukces wielowymiarowych działań w aplikacji Rossmann udowadnia, że nowoczesny e-commerce skutecznie łączy wirtualne wyzwania z fizyczną aktywnością, budując codzienne nawyki użytkowników. Jednocześnie analizy danych z platform takich jak Sharetribe czy przypadek europejskiego e-sprzedawcy dostarczają kluczowego wniosku biznesowego: samo wdrożenie grywalizacji nie prowadzi automatycznie do wzrostu przychodów. Badania dowodzą, że najwyższą wartość sprzedażową generują działania prospołeczne, takie jak np. udostępnianie

czy recenzowanie, ponieważ odpowiadają na ludzką potrzebę relacyjności. Natomiast opieranie mechanik wyłącznie na motywacji zewnętrznej i biernych aktywnościach, takich jak nagradzanie za dodawanie produktów do listy życzeń, potrafi przynieść skutek odwrotny, generując puste interakcje bez wpływu na konwersję. Wymusza to na przedsiębiorstwach konieczność ścisłego dopasowywania rodzaju nagród do konkretnych zachowań i wskaźników efektywności.

Bibliografia:

1. Berman, B. (2006). Developing an Effective Customer Loyalty Program. California Management Review.
2. Bogoslov, I. A., Stoica, E. A., Georgescu, M. R., & Lungu, A. E. (2023). Gamification in E-Commerce: Advantages, Challenges, and Future Trends. *Revista Economică*.
3. Deterding, S., Dixon, D., Khaled, R., Nacke, L. (2011). From Game Design Elements to Gamefulness: Defining "Gamification". Proceedings of the 15th International Academic MindTrek Conference.
4. Farace, S., Montaguti, E., Valentini, S., & Zammit, A. (2025). How does gamification affect customer behavior and revenue? *Italian Journal of Marketing*.
5. Hamari, J. (2017). Do badges increase user activity? A field experiment on the effects of gamification. *Computers in Human Behavior*.
6. Hwang, J., & Choi, L. (2020). Having fun while receiving rewards?: Exploration of gamification in loyalty programs for consumer loyalty. *Journal of Business Research*.
7. Jupowicz-Ginalska, A., Jasiewicz, J., Kisilowska, M., Baran, T., Wysocki, A. (2018). FOMO. Polacy a lęk przed odłączeniem - raport z badań. Warszawa: Wydział Dziennikarstwa, Informacji i Bibliologii UW.
8. Przybylski, A. K., Murayama, K., DeHaan, C. R., & Gladwell, V. (2013). Motivational, emotional, and behavioral correlates of fear of missing out. *Computers in Human Behavior*.
9. Rakhmanita, A., Hurriyati, R., Gaffar, V., Rahayu, A., Wibowo, L. A., & Widjajanta, B. (2023). How the Gamification Loyalty Program Affects Customer Behavior: A Literature Review. Proceedings of the 7th Global Conference on Business, Management, and Entrepreneurship.
10. Ryan, R. M., Deci, E. L. (2000). Self-Determination Theory and the Facilitation of Intrinsic Motivation, Social Development, and Well-Being. *American Psychologist*.

Źródła internetowe

11. Rossmann (2026). Stworzyliśmy największy charytatywny bieg na świecie. https://www.rossmann.pl/inspiracja/stworzylismy-najwiekszy-charytatywny-bieg-na-swiecie,4192?srsId=AfmBOopWVR5R24R-3x_5jPLJNTk7o_Yxg6A2BjltA-6CZPgvsB3agonf (dostęp 26.05.2026).
12. Wirtualne Kosmetyki (2026). Neboa w Strefie Czułości., <https://wirtualnekosmetyki.pl/neboa-w-strefie-czulosci?> (dostęp 08.06.2026).

14. HOW WAS THE FIRST CATHOLIC BIBLE TRANSLATED INTO TAGALOG?

Stanisław Schabowicz

PhD Student in Theology Faculty of Theology

Cardinal Stefan Wyszyński University in Warsaw, Poland

PhD Student in Spanish:

Linguistics, Literature and Communication Department of Spanish Language, University of Valladolid, Spain

<https://orcid.org/my-orcid?orcid=0000-0002-1140-230X>

1. Introduction

The question “*How was the first Catholic Bible translated into Tagalog?*” appears at first to invite a relatively simple historical answer: one might identify the translator, establish the date of publication, and list the languages from which the translation was produced. Such an answer would, however, remain inadequate from both a linguistic and a theological perspective. A Bible is not translated merely by replacing the lexical units of one language with corresponding units in another. Biblical translation involves the transfer of meanings encoded in historically distant languages, literary genres, religious traditions, and systems of thought. When the target language belongs to a culture formed outside the Mediterranean and European environments in which the principal biblical and ecclesiastical traditions developed, the process becomes an especially complex form of intercultural mediation.

José C. Abriol’s *Ang Banal na Biblia* must be examined within precisely this perspective. Its importance does not result only from the fact that it made the complete Catholic canon available in Tagalog. The translation also represents an important stage in the formation of Tagalog as a language capable of expressing biblical theology in a systematic and internally coherent manner. Through Abriol’s work, concepts formed in Hebrew, Aramaic, Greek, Latin, and European Catholic traditions entered a language characterised by a different grammatical structure, a distinct conceptual history, and a religious vocabulary shaped by several centuries of cultural contact.

It is necessary to define the historical status of the translation precisely. *Ang Banal na Biblia* was not the first appearance of biblical material in Tagalog. Biblical prayers, narratives, commandments, formulas, and doctrinal explanations had been transmitted in Tagalog since the publication of the *Doctrina Christiana* in 1593. Nor was Abriol’s work the first complete Bible in Tagalog irrespective of confession, since the Protestant *Ang Biblia* had been published in 1905. Its historical priority concerns the first complete translation of the Catholic biblical canon into Tagalog prepared by a Filipino Catholic translator.

This distinction is essential. The category “*Catholic Bible*” refers not only to the ecclesiastical affiliation of the translator or publisher. It concerns the structure of the translated corpus, including the deuterocanonical books; the textual traditions consulted; the

terminology employed; the organisation of the paratext; and the relationship between the translated text and the liturgical, catechetical, and doctrinal life of the Church.

The objective of this article is to reconstruct the principal stages and linguistic mechanisms through which Abriol's Catholic Bible was translated into Tagalog. The study addresses the following questions:

1. How did the project develop chronologically?
2. Which biblical and modern-language texts did Abriol consult?
3. How were Hebrew and Greek structures transferred into Tagalog?
4. How did Abriol construct or consolidate Tagalog theological terminology?

The central thesis is that *Ang Banal na Biblia* emerged through a multilayered translation process. Hebrew and Greek provided the primary textual basis; Italian and French Catholic Bibles supplied comparative and exegetical assistance; Latin and Spanish remained present through inherited ecclesiastical terminology; and Tagalog supplied the grammatical, semantic, and cultural system within which the biblical message had to acquire a new textual existence.

The methodology combines three perspectives. The historical-bibliographical perspective reconstructs the sequence of translation, publication, and revision. The linguistic perspective examines grammatical transposition, lexical selection, semantic differentiation, and register formation. The theological perspective studies the influence of the Catholic canon, ecclesial tradition, and pastoral purpose on the form of the translation.

A critical hierarchy of evidence is necessary. Bibliographical records and contemporary testimonies are treated as more reliable than later popular accounts. Where the sources remain inconsistent, the uncertainty is preserved as part of the scholarly conclusion rather than concealed through speculation.

2. Before Abriol: Biblical Language Without a Complete Catholic Bible

The history of biblical language in Tagalog began long before the publication of a complete Catholic Bible. The *Doctrina Christiana* of 1593 introduced and consolidated fundamental Christian formulas in Tagalog. It contained prayers such as the Lord's Prayer and the Hail Mary, the Creed, the Ten Commandments, and basic catechetical explanations. Its purpose was not to provide direct access to the entire biblical text but to transmit the elementary structures of Catholic belief and practice.

Subsequent catechisms, prayer books, sermons, liturgical texts, and *pasyon* narratives expanded the Tagalog Christian lexicon. The Filipino faithful encountered biblical history and theology through mediation: Scripture was interpreted, paraphrased, preached, dramatised, sung, and incorporated into devotional narratives. As a result, Tagalog already possessed a substantial Christian vocabulary before Abriol began his project.

This vocabulary was not linguistically homogeneous. It contained indigenous Tagalog words, semantically transformed native expressions, and numerous borrowings from Spanish. The terms used to speak about God, grace, sin, salvation, the Church, sacraments, and eternal life had developed through centuries of interaction between missionary teaching and local linguistic practice.

Abriol therefore did not translate into a religiously empty language. He inherited a rich but internally stratified theological lexicon. His task was to organise this inherited material

within a complete biblical text and to establish consistent relations between terms appearing in different books, genres, and theological contexts.

The Protestant *Ang Biblia* of 1905 constituted another important part of the linguistic context. It demonstrated that a complete Tagalog Bible was possible and contributed to the formation of Tagalog biblical style. Nevertheless, it represented a Protestant canonical and translational tradition. For Catholic readers, the absence of a complete specifically Catholic translation remained significant, particularly in relation to the deuterocanonical books, ecclesiastical terminology, and the interpretative framework supplied by Catholic introductions and notes.

Abriol's project therefore emerged at the intersection of three traditions:

- the indigenous and Hispanic Catholic tradition of Tagalog prayer and catechesis;
- the existing Protestant tradition of complete Tagalog biblical translation;
- the twentieth-century Catholic return to Hebrew and Greek biblical sources.

The originality of *Ang Banal na Biblia* lies in the synthesis of these three historical realities.

3. The Chronological Formation of the Translation

Later biographical sources commonly associate Abriol's work with the period 1953–1963. The exact details of this chronology cannot presently be verified from his personal manuscripts. Nevertheless, the publication of his Tagalog Psalter in 1958 confirms that the project was already advanced during the 1950s.

The title of the Psalter *Ang aklat ng mga salmo batay sa Hebreo at sa Griego* is important not only chronologically but methodologically. It indicates that Abriol was already presenting his work as based on Hebrew and Greek. It also suggests that he prepared at least some biblical books as independent translation units before they were incorporated into the complete Bible.

The Psalms constituted a demanding starting point. Their translation required the negotiation of several differences between Hebrew and Tagalog:

- Hebrew poetic parallelism versus Tagalog patterns of repetition;
- condensed nominal clauses versus more explicitly marked Tagalog predication;
- metaphorical imagery rooted in ancient Israelite culture;
- different systems of verbal aspect;
- the relationship between individual and communal prayer;
- textual differences between Hebrew and Greek traditions.

The translation of the Psalms could therefore function as a linguistic laboratory for the larger project. It compelled Abriol to determine how the solemnity, rhythm, theological vocabulary, and rhetorical structures of biblical prayer could be expressed in Tagalog.

The Philippine eLib documents the publication of *Ang banal na bibliya ayon sa Hebreo at Griego, batay sa La Sacra Bibbia at La Sainte Bible* in 1962. This constitutes the earliest currently verifiable evidence for a complete edition.

Clenista's review refers to the edition as *ikalawang*, or "second." The designation raises an important bibliographical question. If used in its ordinary editorial sense, it indicates that an earlier edition existed. At present, however, the surviving documentation does not permit the first edition to be dated with certainty.

The most responsible scholarly formulation is therefore not that “the first edition was published in 1962,” but that “the earliest presently verified complete edition dates from 1962.” This distinction preserves the documentary evidence without converting a plausible hypothesis into an established fact.

4. From Which Texts Did Abriol Translate?

The central evidence is contained in the title of the 1962 edition: *Ang banal na bibliya ayon sa Hebreo at Griego, batay sa La Sacra Bibbia at La Sainte Bible*. This formula provides a concise description of the translator’s hierarchy of sources.

The phrase *ayon sa Hebreo at Griego* presents Hebrew and Greek as the principal linguistic authorities. Hebrew provided the principal basis for most of the Old Testament. Greek was essential for the New Testament and for the Septuagintal and deuterocanonical traditions.

The reference to Greek has particular theological importance in a Catholic Bible. The Catholic Old Testament cannot be reconstructed solely from the Hebrew Masoretic corpus because several deuterocanonical books and textual forms are preserved principally or entirely in Greek. Abriol’s reference to both languages therefore corresponds to the canonical structure of the work he was translating.

Nevertheless, the available documentation does not identify the exact editions of the Hebrew and Greek texts. It remains uncertain whether Abriol used a particular edition of the *Biblia Hebraica*, a printed Septuagint, an interlinear text, or several editions simultaneously.

The phrase *batay sa La Sacra Bibbia at La Sainte Bible* indicates that Abriol also relied on Italian and French Catholic Bibles.

The use of modern translations did not necessarily weaken the direct relationship with Hebrew and Greek. On the contrary, comparative versions often assist translators in interpreting grammatical ambiguity and evaluating possible semantic equivalents.

The Italian and French Bibles could help Abriol determine:

- whether an ambiguous Hebrew construction had a causal, temporal, or concessive meaning;
- how a Greek theological term had been interpreted in modern Catholic exegesis;
- how long sentences could be segmented without fragmenting their argument;
- which rendering remained consistent with Catholic doctrine;
- how deuterocanonical passages were understood within Catholic tradition.

The modern European versions therefore functioned as interpretative witnesses. They stood between the ancient text and the Tagalog formulation without necessarily replacing the ancient text as the primary source

5. Latin as an Ecclesiastical Memory

Latin is not named in the 1962 title as the immediate basis of translation. Nevertheless, it remained present as the language of Catholic liturgy, theology, biblical nomenclature, and doctrinal tradition.

Abriol’s formation as a Catholic priest occurred in an ecclesiastical culture in which the Vulgate and Latin theology remained highly influential. Latin could therefore shape his

understanding of biblical concepts even when he translated a particular verse from Hebrew or Greek.

This influence was conceptual and terminological rather than necessarily textual in every verse. It appeared in: traditional names of biblical books; forms of personal names; ecclesiastical vocabulary; doctrinal formulas; liturgical expressions; relations between biblical terminology and catechetical language.

6. Spanish as the Historical Mediator

Spanish had shaped Filipino Catholic discourse for more than three centuries. Many Christian terms entered Tagalog through Spanish rather than directly from Latin or Greek.

Abriol inherited this already established vocabulary. He therefore translated within a linguistic environment in which expressions of European origin had become partially or completely integrated into Filipino Catholic usage.

His translation process can consequently be represented as a hierarchy:

1. Hebrew and Greek supplied the principal biblical text.
2. Italian and French Catholic Bibles assisted interpretation.
3. Latin provided ecclesiastical and theological continuity.
4. Spanish supplied historically embedded Catholic terminology.
5. Tagalog reorganised these elements within its own grammar and semantic system.

This was not a simple linear chain. Different passages could activate different parts of the multilingual repertoire.

7. Translation as Grammatical Reconstruction

The structural distance between Hebrew, Greek, and Tagalog meant that Abriol could not translate by maintaining the grammatical form of the source languages. His task required the reconstruction of biblical meaning through Tagalog grammar.

Tagalog possesses a complex verbal system organised through aspect and voice. It marks participants using forms such as *ang*, *ng*, and *sa* and structures information differently from both Hebrew and Greek. Consequently, the same theological proposition must be grammatically reconfigured when transferred into Tagalog.

The passage from John 5:19–24 reproduced in Clenista's review provides concrete evidence. Abriol writes:

Tunay na tunay na sinasabi ko sa inyo na walang magagawa ang Anak sa kanyang sarili kundi yaong nakikita niyang ginagawa ng Ama.

The sentence preserves the relationship between the Son's action and the action of the Father. Yet this relationship is expressed through Tagalog predication and participant marking, not through an imitation of Greek syntax.

The form *walang magagawa ang Anak* places the negated possibility of action at the centre of the clause. The expression *yaong nakikita niyang ginagawa ng Ama* reconstructs the embedded relation between seeing and doing. The grammatical transformation is substantial, but the Christological relation remains clear: the Son does not act independently of the Father. Abriol continues:

Sapagka't minamahal ng Ama ang Anak, at ipinakikita sa kanya ang lahat ng ginagawa niya.

Here the forms *minamahal* and *ipinakikita* encode the actions and their participants through Tagalog verbal morphology. The Father remains the agent of loving and showing; the Son remains the recipient of revelation. Grammatical adaptation therefore serves theological precision.

A similar structure appears in:

Kung paanong pinababangon at binubuhay ng Ama ang mga patay, gayon din naman ang Anak ay nagbibigay ng buhay sa kanyang maibigan.

The correlational construction *kung paanong ... gayon din naman* reproduces the logical analogy between the Father and the Son. The verbal forms *pinababangon*, *binubuhay*, and *nagbibigay ng buhay* express causation and agency through Tagalog resources.

The example shows that Abriol's fidelity was relational rather than mechanically syntactic. He preserved who acts, who receives the action, how the actions are compared, and what theological conclusion follows from the comparison.

8. Translation as the Reconstruction of Biblical Rhetoric

Biblical meaning is carried not only by individual words but also by repetition, parallelism, contrast, and discourse progression. Abriol frequently preserved these features even when a stylistically freer translation could have shortened them.

The formula: *Tunay na tunay na sinasabi ko sa inyo* reproduces the doubled Johannine *amen, amen*. The repetition is not redundant. It marks the authority and solemnity of Jesus' declaration. Abriol renders this function through the repeated Tagalog adjective *tunay*.

Similarly, the repeated use of *Ama* and *Anak* creates lexical cohesion throughout John 5. A stylistically varied translation might replace repeated nouns with pronouns, but such variation could weaken the explicit theological relationship between the Father and the Son.

Abriol's method therefore demonstrates sensitivity to what may be termed theological repetition. In biblical discourse, recurrence can carry doctrinal content. Fidelity sometimes requires preserving repetition rather than improving stylistic variety according to modern literary preferences.

9. Translation as Terminological Discernment

One of Abriol's most consequential tasks was the selection of Tagalog equivalents for biblical and theological concepts. These choices were neither exclusively linguistic nor exclusively doctrinal. They occurred at the intersection of semantics, ecclesiastical tradition, reader comprehension, and confessional identity.

Tagalog words could acquire specialised theological meanings through biblical context. *Ama* ordinarily denotes a father, but in Trinitarian and Christological contexts it becomes a divine designation. *Anak* moves from ordinary kinship vocabulary to the title of the Son of God.

The word *buhay* can denote biological existence, but biblical usage extends it toward eternal life, divine life, and the life communicated by Christ. *Paghatol* can refer to judgement in ordinary human relations, but in biblical discourse it becomes connected with divine authority and eschatology.

Translation therefore produces terminological specialisation. A common word becomes a theological term not because its basic lexical meaning disappears, but because its range is restructured by biblical context.

Catholic Tagalog offered Abriol competing possibilities. He could employ an indigenous term, a deeply assimilated Spanish borrowing, or a more visibly ecclesiastical form.

The contrast between *biyaya* and *grasya* is illustrative. *Biyaya* is semantically accessible and evokes gift, blessing, or favour. *Grasya*, derived from Spanish *gracia*, connects more directly with Catholic doctrinal and liturgical usage. The two forms overlap but do not activate identical associations.

Likewise, *Salita* and *Verbo* may both be related to the theological concept of the Word. *Salita* is transparent in ordinary Tagalog, while *Verbo* preserves the historical connection with Latin *Verbum* and Spanish *Verbo*. The choice determines whether the translator prioritises immediate intelligibility, intertextual continuity, or terminological specialisation. A similar tension appears in *binyag* and *bautismo*, or in *pari* and *saserdote*. These pairs demonstrate that translation is not limited to identifying a possible equivalent. It requires selecting which layer of the religious lexicon will carry the theological concept in a specific context.

Some lexical choices identify a text as Catholic even when their general meaning remains comprehensible to other Christian readers. Such forms connect the Bible with the language of the Mass, the sacraments, catechisms, devotional literature, and traditional prayer. Abriol's terminology therefore performs two functions simultaneously: it communicates biblical meaning; it locates that meaning within the Catholic linguistic community. The confessional dimension is especially important in a context where Catholic and Protestant Tagalog Bibles coexist.

The Catholic character of Abriol's Bible is visible most clearly in the structure of the translated corpus. The inclusion of the deuterocanonical books transformed the project from a new linguistic version into the first complete Tagalog representation of the Catholic canon.

Canon influenced translation at several levels. It determined which books were included, how they were ordered, which textual traditions required consultation, and how intertextual relationships were established.

The deuterocanonical books also complicated the linguistic basis of the translation. A simple opposition between the "*Hebrew Old Testament*" and the "*Greek New Testament*" would not adequately describe the Catholic corpus. Greek was also necessary for significant parts of the Old Testament tradition.

Abriol's declaration that his translation followed "the Hebrew and Greek" was therefore not a decorative scholarly formula. It corresponded to the textual plurality of the canon he intended to translate.

10. Reconstructing Abriol's Translation Model

The surviving evidence permits Abriol's translational method to be reconstructed not as a rigid sequence of eight mechanically separated operations, but as a complex and cumulative process of philological inquiry, theological interpretation, and linguistic mediation.

Abriol's extensive knowledge of the biblical languages, together with his competence in several modern European languages, provided the intellectual foundation for the project. This multilingual formation enabled him to distinguish between the semantic and grammatical structures of the source texts, their interpretation within Catholic biblical tradition, and the range of possible formulations available in the target language. Hebrew and Greek were thus not treated merely as repositories of lexical meanings but as historically situated systems in which theological content was encoded through particular grammatical constructions, rhetorical patterns, metaphors, and forms of textual organisation.

The Tagalog Psalter documented in 1958 indicates that the translation developed gradually through work on individual biblical corpora before their incorporation into the complete Bible. The Psalms may have constituted an especially important testing ground for Abriol's method. Their poetic parallelism, semantic density, metaphorical imagery, and liturgical function required the translator to preserve not only propositional meaning but also the prayerful and theological character of the text. The publication of this partial translation therefore suggests that the complete *Ang Banal na Biblia* emerged from a prolonged process of translating, comparing, revising, and integrating individual books rather than from the uninterrupted rendering of a single pre-existing European version.

The Hebrew and Greek traditions supplied the principal textual point of reference. Abriol had to identify which elements of the source text were theologically and rhetorically constitutive and consequently required preservation in Tagalog. These included the distribution of agency, the relations between participants, patterns of repetition and parallelism, temporal and causal connections, and lexical distinctions carrying doctrinal significance. Fidelity could not consist in reproducing the external form of Hebrew or Greek syntax, because Tagalog organises predication, aspect, participant roles, and information structure according to fundamentally different grammatical principles. It required the reconstruction of the source text's semantic and theological relations within the linguistic architecture of Tagalog.

The Italian *La Sacra Bibbia* and the French *La Sainte Bible* appear to have functioned as interpretative and terminological controls. They did not simply replace the original texts as intermediary sources. Rather, they allowed Abriol to compare alternative interpretations of difficult passages, examine how modern Catholic biblical scholarship resolved semantic ambiguities, and maintain continuity with the Church's exegetical and doctrinal tradition. Their role was particularly important wherever the ancient text permitted more than one grammatically possible interpretation or where a seemingly minor lexical choice carried substantial theological consequences.

The selection of Tagalog equivalents consequently involved more than the identification of words with approximately similar dictionary meanings. Abriol evaluated possible renderings according to their semantic scope, grammatical compatibility, ecclesiastical recognisability, and doctrinal adequacy. A proposed equivalent had to function not only within an isolated verse but also within the wider theological system of Scripture. This requirement was especially significant in Christological, Trinitarian, soteriological, and sacramental passages, where the relation between terms could be as important as the meaning of each individual expression. The translation of *Father* and *Son*, for example, had to preserve

not only two divine designations but also the relational structure through which the biblical text articulates the identity and activity of Christ.

At the grammatical level, Hebrew and Greek constructions were recast through the resources proper to Tagalog. Verbal voice and aspect, participant marking, clause linkage, and information structure allowed Abriol to preserve the distribution of action and responsibility without imitating the linear order of the source languages. Such transformations were not departures from fidelity but conditions of meaningful fidelity. A formally copied Greek or Hebrew structure could become obscure or misleading in Tagalog, whereas a grammatically reconfigured sentence could reproduce the semantic hierarchy and theological emphasis of the source text with greater precision.

At the lexical level, Abriol worked within a religious vocabulary already shaped by several centuries of interaction between indigenous Tagalog expression and the Latin-Spanish Catholic tradition. He did not simply choose between “native” and “borrowed” words. He organised both categories into a coherent biblical register. Indigenous lexemes could acquire specialised theological meanings through their repeated use in scriptural contexts, while established borrowings preserved continuity with the language of doctrine, liturgy, catechesis, and devotional practice. The resulting vocabulary was therefore simultaneously biblical, ecclesial, and culturally Filipino.

Abriol’s method can ultimately be understood as an act of mediated theological transfer. The meaning of the biblical text moved from Hebrew and Greek into Tagalog through philological analysis, comparison with Catholic interpretative traditions, grammatical reconstruction, and terminological discernment. The complete translation did not merely reproduce a pre-existing theological discourse in another linguistic code. It established the linguistic conditions under which the Catholic canon could be read, proclaimed, interpreted, and prayed in Tagalog.

11. Conclusion

The first complete Catholic Bible in Tagalog was produced through a process considerably more complex than the direct substitution of Tagalog words for Hebrew and Greek expressions. José C. Abriol worked within a multilingual network of texts and traditions.

Hebrew and Greek constituted the declared principal bases. Italian and French Catholic Bibles served as interpretative and terminological controls. Latin remained present through theology, liturgy, and biblical nomenclature, while Spanish supplied a historically established layer of Filipino Catholic vocabulary.

Abriol transferred biblical meaning by reconstructing it within Tagalog grammar. He adapted word order, verbal morphology, participant marking, and clause relations while preserving theological agency, conceptual contrasts, and rhetorically significant repetition. His translation therefore demonstrates formal fidelity at the level of semantic and theological relations rather than mechanical imitation of source-language syntax.

He also selected among indigenous terms, assimilated borrowings, and traditional Catholic expressions. These decisions allowed the text to remain both linguistically Filipino and recognisably Catholic. The inclusion of the deuterocanonical books gave the Catholic canon its first complete Tagalog textual form.

Ang Banal na Biblia was therefore more than the reproduction of Scripture in another language. It was the moment at which the complete Catholic biblical canon acquired a Tagalog linguistic architecture. Through Abriol's work, Tagalog became not only a language in which biblical content could be communicated, but a language in which Catholic biblical theology could be systematically articulated.

Bibliography:

1. Abriol, José C. *Ang aklat ng mga salmo batay sa Hebreo at sa Griego: mga panalanging ipinasulat ng Diyos*. 1958. Bibliographical record in the Philippine eLib.
2. Abriol, José C. *Ang banal na bibliya ayon sa Hebreo at Griego, batay sa La Sacra Bibbia at La Sainte Bible*. Pasay City: St. Paul, 1962.
3. Abriol, José C. *Ang Banal na Biblia: Natatanging Edisyon, Jubileo A.D.* Pasay City: Paulines Publishing House/Daughters of St. Paul, 2000. ISBN 971-590-107-7.
4. Bassnett, Susan. *Translation Studies*. 4th ed. London–New York: Routledge, 2014.
5. Clenista, Amadito V., Jr. "The Bible of Monsignor J. C. Abriol, D.P." *Boletín Eclesiástico de Filipinas*, 457–460. University of the Philippines Diliman Open Access Repository.
6. Manila Cathedral. "Msgr. Jose C. Abriol (1962–1975)." Official biographical profile. Manila Cathedral.
7. Nida, Eugene A. *Toward a Science of Translating*. Leiden: E. J. Brill, 1964.
8. Nida, Eugene A., and Charles R. Taber. *The Theory and Practice of Translation*. Leiden: E. J. Brill, 1969.
9. Philippine eLib. "Abriol, J. C." Bibliographical records for *Ang Banal na Biblia* and *Ang aklat ng mga salmo*. Philippine eLib.
10. Pius XII. *Divino afflante Spiritu*. Vatican City, 1943.
11. Pontifical Biblical Commission. *The Interpretation of the Bible in the Church*. Vatican City: Libreria Editrice Vaticana, 1993.
12. Second Vatican Council. *Dogmatic Constitution on Divine Revelation Dei Verbum*. 1965.
13. Toury, Gideon. *Descriptive Translation Studies—and Beyond*. Revised edition. Amsterdam–Philadelphia: John Benjamins, 2012.
14. Venuti, Lawrence. *The Translator's Invisibility: A History of Translation*. 3rd ed. London–New York: Routledge, 2018.
15. Wilt, Timothy, ed. *Bible Translation: Frames of Reference*. Manchester: St. Jerome Publishing, 2003.

15. BETWEEN FIDELITY AND ADAPTATION: TRANSLATING POPE LEO XIV'S BILINGUAL SPANISH – CATALAN HOMILY AT THE SAGRADA FAMÍLIA

Stanisław Schabowicz

PhD Student in Theology Faculty of Theology

Cardinal Stefan Wyszyński University in Warsaw, Poland

PhD Student in Spanish: Linguistics, Literature and Communication Department of Spanish Language, University of Valladolid, Spain

<https://orcid.org/my-orcid?orcid=0000-0002-1140-230X>

1. Introduction

Papal homilies delivered in multilingual contexts combine theological communication with linguistic choices determined by the local ecclesial and cultural setting. The homily delivered by Pope Leo XIV during Mass in the Basilica of the Sagrada Família in Barcelona on 10 June 2026 provides a particularly relevant example. The official Vatican edition identifies that the text [<https://www.vatican.va/content/leo-xiv/es/homilies/2026/documents/20260610-spagna-messa-sagrada-familia.html>] contains extended Catalan passages followed by their Spanish renderings in square brackets.

The bilingual character of the document creates a clearly delimited comparative corpus. The Catalan passages and their corresponding Spanish versions communicate the same theological themes, including the Eucharist, the Church as a family and living temple, Christ's salvific work, the symbolism of the family, sacred architecture and evangelisation through art. At the same time, the two linguistic formulations are not formally identical. Alongside close semantic and metaphorical correspondence, the Spanish renderings contain grammatical restructuring, lexical specification, changes in tense and additional emphatic elements.

The present study concentrates exclusively on the relationship between fidelity and adaptation in the Catalan–Spanish textual pairs. In this study, fidelity and adaptation are not understood as mutually exclusive categories. Fidelity concerns the preservation of theological meaning, metaphorical relations, rhetorical organisation and the function of a particular passage. Adaptation refers to changes through which the Spanish rendering restructures, specifies or intensifies an element expressed in Catalan. A formally modified target segment may therefore remain faithful at the theological and communicative levels.

The official Vatican edition is particularly important methodologically because the two language forms are presented within the same document. The analysis does not reconstruct an assumed source text or evaluate unofficial translations. It compares only the Catalan passages printed in the document with the Spanish renderings supplied immediately after them by the Vatican edition.

The principal aim of the study is to determine how the Spanish renderings reproduce and adapt the theological content, metaphorical structures and rhetorical organisation of the Catalan passages in Pope Leo XIV's homily at the Sagrada Família.

The analysis addresses the following research question: *How does the official Spanish rendering balance fidelity to the Catalan passages with grammatical, lexical, temporal and rhetorical adaptation?*

The study employs a qualitative comparative method based on close textual analysis. The procedure comprises four stages: Identification of textual pairs. Each Catalan passage is aligned with the Spanish rendering supplied in the Vatican edition. Segmentation into comparable units. The aligned passages are divided into clauses, phrases and individual lexical units containing the same theological or rhetorical proposition. Identification of correspondences and shifts. The analysis examines lexical equivalence, grammatical structure, verbal tense and mood, metaphorical organisation, rhetorical parallelism and theological meaning. Classification within the fidelity–adaptation continuum.

The analytical material is organised into two principal groups:

- cases of fidelity, demonstrating the preservation of theological content, ecclesiological or Christological metaphors and rhetorical relations;
- cases of adaptation, demonstrating grammatical restructuring, lexical specification, tense modification or the addition of emphatic elements.

This restricted corpus and qualitative method allow the study to provide a precise account of how fidelity and adaptation interact within a single officially published bilingual papal homily.

2. Cases of Fidelity between the Catalan and Spanish Texts

Fidelity [Kluj, 2013] can therefore be examined through a direct comparison between the Catalan segments and their editorial Spanish equivalents. The five cases below demonstrate the preservation of theological meaning, metaphorical structure and rhetorical organisation across the two languages.

Case 1: The Basilica as a Welcoming Ecclesial Family

Catalan	Spanish
“Avui la Basílica de la Sagrada Família ens acull en aquesta bella ciutat, obrint les seves portes com si fossin braços que conviden a cadascú en aquest altar a escoltar la Paraula de Déu. És un temple que ens constitueix en una família estimada pel Senyor, alimentada per la seva pròpia vida en l'Eucaristia.”	“Hoy la Basílica de la Sagrada Familia nos acoge en esta hermosa ciudad, abriendo sus puertas como si fueran sus brazos para invitar a cada uno a este altar, a escuchar la Palabra de Dios. Es un templo que nos constituye en una familia amada por el Señor, alimentada por su propia vida en la Eucaristía.”

The Spanish rendering reproduces the Catalan passage with a high degree of lexical, semantic and rhetorical fidelity. Both versions develop the same progression of images: the basilica welcomes the participants, its open doors resemble embracing arms, the assembly gathers around the altar to hear the Word of God, and the temple constitutes those present as a family loved by the Lord and nourished by divine life in the Eucharist. The architectural setting is consequently transformed into an ecclesiological representation of the Church as a welcoming and Eucharistic community.

Personification and the semantics of hospitality

The initial correspondence between Catalan *Avui la Basílica de la Sagrada Família ens acull* and Spanish *Hoy la Basílica de la Sagrada Familia nos acoge* is almost structurally complete:

Catalan	Spanish	Function
<i>Avui</i>	<i>Hoy</i>	temporal anchoring of the liturgical event
<i>la Basílica de la Sagrada Família</i>	<i>la Basílica de la Sagrada Familia</i>	personified grammatical subject
<i>ens acull</i>	<i>nos acoge</i>	reception and incorporation of the assembly

The verbs *acollir* and *acoger* belong to the same semantic field and express more than physical admission into a building. In this context, they evoke welcome, protection and inclusion. The basilica is presented as an active host rather than a passive location. The first-person plural object pronouns *ens* and *nos* include the speaker within the gathered community. The Pope therefore does not describe the participants from outside; linguistically, he places himself among those received by the basilica.

This personification introduces the ecclesial interpretation of the building. The basilica performs symbolically what the Church performs communally: it receives people, gathers them and directs them towards the Word and the Eucharist. The architectural space thereby becomes an active sign of ecclesial hospitality.

The metaphor of doors as arms

The participial construction *obrint les seves portes* is reproduced directly as *abriendo sus puertas*. Both forms indicate an action simultaneous with the act of welcoming: the basilica receives the congregation by opening its doors. This produces a semantic correspondence between the material act of opening and the relational act of welcoming.

A minor grammatical modification appears in the comparison: Catalan: *com si fossin braços*

Spanish: *como si fueran sus brazos*

The Catalan text identifies the doors metaphorically as “*arms*” without an explicit possessive before *braços*. Spanish introduces *sus*, making the relationship between the basilica and the metaphorical arms more explicit: the doors open “*as if they were its arms*.” This addition does not alter the underlying image. It clarifies the referential connection between the personified basilica and the arms attributed to it.

Both versions employ the imperfect subjunctive *fossin* and *fueran* after the comparative construction *com si / como si*. The mood marks the identification of the doors with arms as figurative rather than literal. The same grammatical mechanism therefore sustains the architectural personification in both languages.

The image also prepares the familial metaphor in the following sentence. Arms connote welcome and embrace, while the temple subsequently constitutes the participants as a family. The metaphorical sequence is coherent: the basilica first opens its “*arms*” and then gathers those received into an ecclesial family.

From relative clause to infinitival purpose

The clearest syntactic difference concerns the action of invitation: Catalan: *braços que conviden a cadascú* Spanish: *sus brazos para invitar a cada uno*

Catalan uses the finite relative clause *que conviden*, in which the metaphorical arms function directly as the subject of *conviden*. Spanish replaces this with the purposive infinitival construction *para invitar*. As a result, the Catalan passage foregrounds an action performed by the arms, whereas the Spanish passage presents invitation as the purpose for which the basilica opens its doors.

The difference can be represented as follows:

Version	Structure	Emphasis
Catalan	arms that invite	personified activity of the arms
Spanish	opens its arms in order to invite	purpose of opening the doors

This syntactic restructuring slightly reduces the grammatical autonomy of the metaphorical arms in Spanish, but it preserves their communicative function. In both versions, the opening of the basilica is directed towards the personal reception of every participant. The Spanish construction is therefore functionally equivalent to the Catalan relative clause, although it reorganizes the relationship between image and action.

Individual invitation and communal incorporation

Catalan *a cadascú* corresponds accurately to Spanish *a cada uno*. Both distributive expressions individualize the invitation: the basilica welcomes not merely an anonymous crowd but every person present. This individualizing element is subsequently balanced by the collective noun *família/familia*. The passage thus moves from individual reception to communal belonging: the basilica receives “*us*” *ens / nos*; it invites “*each person*” *cadascú / cada uno*; it constitutes those present as “*a family*” *una família / una familia*. This pronominal and nominal progression combines personal dignity with ecclesial communion. Each participant is individually invited, yet no participant remains isolated; those welcomed are constituted together as one family.

The sequence *a aquest altar a escoltar* is rendered as *a este altar, a escuchar*. The Spanish comma separates the movement towards the altar from the act of listening more visibly than the Catalan punctuation. It guides the reader through two closely connected components: gathering at the altar and listening to the Word of God. The Spanish text does not introduce a new theological element but makes the internal organization of the sentence slightly more explicit.

Preservation of the liturgical axis

The correspondence *la Paraula de Déu - la Palabra de Dios* retains the capitalization and the specifically theological meaning of “*Word of God*.” The reference is not simply to spoken language but to the divine Word proclaimed within the liturgical celebration. The altar and the Word consequently appear within one integrated liturgical space. The passage joins two principal dimensions of the liturgy: listening to the Word of God; being nourished by divine life in the Eucharist.

Spanish preserves this organization without omission or theological reformulation. The basilica is not represented merely as a monument or an architectural achievement. It is a liturgical space in which the community listens to God’s Word and receives Eucharistic nourishment.

The constitutive function of the temple

The sentence *És un temple que ens constitueix en una família* is reproduced directly as *Es un templo que nos constituye en una familia*. The verb *constituir* is particularly significant. Neither version uses a weaker expression such as “*makes us feel like a family*” or “*brings a family together*.” Instead, the temple *constitutes* the participants as a family.

This formulation gives the gathering an ecclesiological rather than merely emotional character. The community is not defined only by mutual affection or physical proximity. Its identity arises within the liturgical space through its relationship with the Lord, the Word and the Eucharist. Spanish retains the strong causative and identity-forming force of Catalan *constitueix* through the cognate verb *constituye*.

The present tense *constitueix / constituye* also represents ecclesial formation as an action occurring in the liturgical present. It is connected directly with the temporal deictic markers *Avui / Hoy*. The passage therefore describes not only a general property of the basilica but an ecclesial event taking place “*today*” among the participants.

From *estimada* to *amada*

The correspondence *una família estimada pel Senyor - una familia amada por el Señor* preserves both the passive construction and divine agency:

Catalan	Spanish	Theological function
<i>família estimada</i>	<i>familia amada</i>	the community as recipient of divine love
<i>pel Senyor</i>	<i>por el Señor</i>	the Lord as agent of that love

Catalan *estimada* can express being loved, cherished or held dear. Spanish *amada* selects the explicitly affective and relational meaning of the Catalan participle. It avoids the possible evaluative meanings associated with Spanish *estimada*, such as “esteemed” or “estimated.” The Spanish choice therefore preserves the intended theological meaning with greater idiomatic precision.

The passive construction is retained. The family is not presented as producing its own ecclesial identity; it is the recipient of the Lord’s love. This divine agency continues in the participle *alimentada*, producing a parallel description of the community as both loved and nourished.

Eucharistic nourishment and divine agency

Catalan *alimentada per la seva pròpia vida en l’Eucaristia* is rendered almost word for word as Spanish *alimentada por su propia vida en la Eucaristía*. The Spanish version retains: the passive participle *alimentada*; the causal or agentive phrase *per/por la seva/su pròpia/propia vida*; the liturgical location or means *en l’Eucaristia/en la Eucaristía*.

The possessive *seva/su* refers to the Lord, while *pròpia/propia* emphasizes that the nourishment offered to the ecclesial family is the Lord’s own life. The Spanish text preserves this reflexive intensification rather than reducing the formulation to a general reference to Eucharistic nourishment. The two passive participles create a significant parallelism: *estimada* / *amada* by the Lord; *alimentada* / *alimentada* by his own life.

The community is thus represented as the recipient of two coordinated divine actions: love gives it relational identity, while Eucharistic nourishment sustains its life. Spanish preserves this parallel structure and its theological emphasis on divine initiative.

Metaphorical and ecclesiological coherence

The passage develops a coherent network of mutually reinforcing images:

Dimension	Textual realization	Ecclesiological meaning
Architectural	basilica, doors, altar, temple	visible ecclesial and liturgical space
Anthropomorphic	doors as arms	welcome, openness and embrace
Familial	constituted as a family	communion and shared identity
Scriptural	listening to the Word of God	receptive faith
Eucharistic	nourished by the Lord’s own life	sacramental participation in divine life

Spanish retains all five dimensions and their internal order. No image is omitted, replaced or secularized. The translation preserves the movement from exterior architecture to ecclesial identity: doors become arms, visitors become a family, and the building becomes the place of listening and Eucharistic nourishment.

Case 3: The Christological Interpretation of the Three Façades

Catalan	Spanish
<i>“Les tres façanes de la Sagrada Família en donen testimoni: el Primer es fa el darrer per a nosaltres en el Nadal; amb el seu sacrifici ens redimeix mitjançant la Passió; la seva mort ens dóna la vida eterna fent-nos partícips de la glòria divina.”</i>	<i>“Las tres fachadas de la Sagrada Familia lo atestiguan: el Primero se hace el último por nosotros en la Natividad; con su sacrificio nos redime mediante la Pasión; su muerte nos da la vida eterna haciéndonos partícipes de la gloria divina.”</i>

The Spanish version reproduces the tripartite Christological structure of the Catalan passage. The three clauses correspond to the mysteries represented by the façades:

1. Nativity: “*el Primer es fa el darrer*” - “*el Primero se hace el último*”;
2. Passion: “*ens redimeix mitjançant la Passió*” - “*nos redime mediante la Pasión*”;
3. participation in divine glory: “*ens dóna la vida eterna*” - “*nos da la vida eterna.*”

The paradoxical opposition between *Primer* and *darrer* is preserved as *Primero* and *último*. The present-tense forms *es fa*, *redimeix* and *dóna* correspond to *se hace*, *redime* and *da*. The translation therefore maintains the presentation of Christ’s salvific action as a presently operative theological reality.

Catalan *Nadal* is rendered as Spanish *Natividad*. The translation does not use the more common Spanish term *Navidad* but selects the liturgically precise *Natividad*, preserving the theological register of the passage.

Case 3: The Cross as a Transformation from Death to Hope

Catalan	Spanish
<i>“Mirant Crist podem veure el món amb ulls renovats: la torre de la creu es converteix aleshores en un estàndard de caritat, perquè Déu ens estima així, transformant un instrument de mort en signe d’esperança.”</i>	<i>“Mirando a Cristo podemos ver el mundo con ojos renovados: la torre de la cruz se convierte entonces en estandarte de caridad, porque Dios nos ama así, transformando un instrumento de muerte en signo de esperanza.”</i>

The Spanish version reproduces with a high degree of fidelity the tripartite Christological structure of the Catalan passage. The three façades of the Sagrada Família are interpreted not merely as architectural components but as a visual representation of the principal mysteries of Christ’s salvific work: his Nativity, Passion and glorification. The passage consequently transforms the basilica’s architectural organization into a concise Christological and soteriological narrative.

Architecture as Christological testimony

The introductory clause establishes the interpretative function of the façades: Catalan: *Les tres façanes de la Sagrada Família en donen testimoni* Spanish: *Las tres fachadas de la Sagrada Familia lo atestiguan*. The correspondence *façanes* - *fachadas* preserves the architectural referent, while *donen testimoni* - *atestiguan* maintains the semantic field of

testimony. The façades are personified as witnesses: through their artistic form and iconographic content, they bear testimony to Christ and his saving work.

A structural shift appears in the treatment of the anaphoric pronoun:

Catalan	Spanish	Function
<i>en</i>	<i>lo</i>	reference to the preceding theological content
<i>donen testimoni</i>	<i>atestiguan</i>	expression of testimony

Catalan *en* is an adverbial pronoun required by the construction *donar testimoni de*. Spanish has no direct grammatical equivalent of this Catalan clitic and therefore uses the neuter pronoun *lo*, which refers globally to the preceding proclamation concerning the Cross of Christ and its transformative meaning. This is a systemically motivated grammatical adaptation rather than a change in content.

The verbal expression is also condensed. Catalan uses the analytic construction *donen testimoni*, literally “give testimony,” whereas Spanish selects the synthetic verb *atestiguan*. Both formulations assign the same testimonial function to the façades. Spanish therefore preserves the semantic force of the Catalan expression through a more compact and idiomatic verbal form.

Tripartite Christological organization

The colon following *testimoni/atestiguan* introduces three coordinated clauses. Their order corresponds to the Christological movement from the Incarnation to the Passion and, finally, to eternal life and participation in divine glory:

Stage	Catalan	Spanish	Theological content
Nativity	<i>el Primer es fa el darrer per a nosaltres en el Nadal</i>	<i>el Primero se hace el último por nosotros en la Natividad</i>	self-abasement and solidarity
Passion	<i>amb el seu sacrifici ens redimeix mitjançant la Passió</i>	<i>con su sacrificio nos redime mediante la Pasión</i>	sacrificial redemption
Glory	<i>la seva mort ens dóna la vida eterna fent-nos partícips de la glòria divina</i>	<i>su muerte nos da la vida eterna haciéndonos partícipes de la gloria divina</i>	passage from death to eternal life and participation in divine glory

The semicolon-separated structure is preserved exactly. This punctuation prevents the three propositions from becoming independent statements: they remain in three stages of a single salvific narrative. The Spanish version retains both the progression and the internal balance of the Catalan text.

The paradox of the First becoming the last

The first clause is organized around an antithetical relationship: *el Primer - el darrer el Primero - el último*

Spanish preserves the paradox rather than neutralizing it through an explanatory paraphrase. Christ, identified as *the First*, becomes *the last*. The contrast expresses a reversal of status: the one who possesses primacy freely assumes the lowest position for humanity.

The capitalization of *Primer/Primero* is preserved. It indicates that the expression functions as a Christological designation rather than merely as an ordinal adjective. By contrast, *darrer/último* remains lowercase, marking the condition assumed by the one designated as *the First*. Spanish maintains this typographical distinction and, consequently, the theological hierarchy embedded in the opposition.

Catalan *darrer* and Spanish *último* are semantically equivalent in this context. The Spanish version does not mechanically reproduce the Catalan form with a less natural cognate but chooses the standard antonym of *primero*. The established Spanish opposition *primero-último* also preserves the concise, proverbial and potentially biblical resonance of the Catalan antithesis.

The reflexive expression of self-abasement

The verbal correspondence *es fa – se hace* preserves the reflexive construction. Christ is not merely described as being placed last by an external agent; he “*makes himself*” or “*becomes*” the last. The grammatical form therefore presents his abasement as a freely accepted movement.

The present tense is maintained in both languages. Although the Nativity is a historical event, *es fa/se hace* does not confine its theological meaning to the past. The liturgical present makes Christ’s self-giving action accessible as a presently proclaimed mystery. Spanish retains this temporal perspective without converting the verb into a historical preterite. The beneficiary phrase also remains stable: Catalan: *per a nosaltres* Spanish: *por nosotros*. Both expressions identify humanity as the beneficiary of Christ’s self-abasement. Spanish *por nosotros* can convey both benefactive and representative-sacrificial meanings: Christ acts “*for us*” and “*on our behalf*.” The translation thus preserves the soteriological orientation of the Catalan phrase.

From Nadal to Natividad

The most significant lexical adaptation in the first clause is: Catalan: *en el Nadal*
Spanish: *en la Natividad*

The standard everyday Spanish equivalent of Catalan *Nadal* would normally be *Navidad*. The Spanish text instead employs *Natividad*, a term with a more explicitly liturgical, theological and iconographic register. In the context of the Sagrada Família, this choice also corresponds

The shift consequently produces a degree of register elevation:

Term	Dominant association
Catalan <i>Nadal</i>	feast of Christmas; liturgical and general usage
Spanish <i>Navidad</i>	common and liturgical name of Christmas
Spanish <i>Natividad</i>	theological mystery and iconographic representation of Christ's birth

The Spanish choice foregrounds the mystery represented by the façade rather than the cultural celebration of Christmas. This is a form of lexical adaptation, but it strengthens rather than weakens the Christological and architectural coherence of the passage.

Sacrifice, Passion and redemption

The second clause is reproduced with almost complete lexical and syntactic correspondence: *amb el seu sacrifici - con su sacrificio; ens redimeix - nos redime; mitjançant la Passió - mediante la Pasión*. The phrase *amb el seu sacrifici/con su sacrificio* identifies Christ's sacrifice as the basis or means of redemption. The possessive *seu/su* retains the personal attribution: the redemptive sacrifice belongs to Christ and consists in his self-offering. The object pronouns *ens/nos* again include the speaker and the congregation among the recipients of salvation. The passage does not formulate redemption as an abstract doctrinal proposition; it presents it relationally as an action performed by Christ for "us."

The verb pair *redimeix - redime* preserves the precise soteriological terminology. Spanish does not replace *redime* with a broader verb such as *salva* or *libera*. As a result, the direct relationship between sacrifice and redemption remains fully visible.

Catalan *mitjançant* and Spanish *mediante* introduce the Passion as the means through which redemption takes place. The capitalization of *Passió/Pasión* is preserved, indicating that the nouns designate the specific salvific mystery of Christ's Passion rather than suffering in a general sense.

The paradox of death giving life

The third clause contains a second theological paradox: Catalan: *la seva mort ens dóna la vida eterna* Spanish: *su muerte nos da la vida eterna*

The opposition between *mort/muerte* and *vida/vida* is preserved without explicitation. Christ's death is grammatically presented as the subject of the life-giving action, while the community is represented by the indirect object pronouns *ens/nos*. The syntactic structure therefore encodes a complete soteriological relationship:

Element	Function
<i>la seva mort / su muerte</i>	source of the salvific gift
<i>ens dóna / nos da</i>	act of giving
<i>la vida eterna</i>	gift received by the community

The paradox complements the earlier opposition between *Primer/Primero* and *darrer/último*. In both cases, salvation is expressed through reversal: the First becomes the last, and death becomes the source of life. Spanish preserves this rhetorical and theological pattern.

Participation in divine glory

The final gerundial construction is transferred directly: Catalan: *fent-nos partícips de la glòria divina* Spanish: *haciéndonos partícipes de la gloria divina*

The gerund expresses the result or consequence of Christ's gift of eternal life. The translation preserves the causative construction: Christ's death not only gives eternal life but also makes human beings participants in divine glory.

The term *partícips/partícipes* is particularly important. The text does not merely state that believers contemplate or receive divine glory externally. They are made participants in it. Spanish preserves this participatory meaning and its theological density through the exact cognate equivalent. Likewise, *glòria divina* – *gloria divina* remains unchanged at the semantic level. The final phrase constitutes the culmination of the entire sequence: Christ's movement towards the lowest place and his sacrificial death result in humanity's elevation to participation in divine glory.

Present-tense representation of the Paschal mystery

All three principal verbs remain in the present tense:

Catalan	Spanish
<i>es fa</i>	<i>se hace</i>
<i>ens redimeix</i>	<i>nos redime</i>
<i>ens dóna</i>	<i>nos da</i>

This temporal consistency is theologically significant. The passage refers to historical mysteries the Nativity, Passion, and death of Christ but presents their saving effects as presently operative. Spanish reproduces this liturgical actualization without shifting the verbs into past-tense narration.

The present tense also enables the three façades to function as enduring testimony. What the architecture represents is not treated as a closed historical sequence. The basilica continually proclaims that Christ becomes the last for humanity, redeems it and gives it eternal life.

Case 4: Faith Giving Form and Meaning to the Building

Catalan	Spanish
<i>“És la fe que dóna forma a les pedres i sentit a l'edifici que habitem junts.”</i>	<i>“Es precisamente la fe la que da forma a las piedras y sentido al edificio que habitamos juntos.”</i>

The Spanish version preserves the central proposition of the Catalan sentence: faith gives physical form to the stones and theological meaning to the building inhabited by the community. The principal lexical correspondences are direct, while the Spanish additions *precisamente* and *la que* intensify the focalization of faith as the exclusive grammatical and theological agent of this transformative action.

Lexical and structural correspondence

Catalan	Spanish	Semantic function
<i>la fe</i>	<i>la fe</i>	theological and grammatical agent
<i>dóna forma</i>	<i>da forma</i>	formation of the material structure
<i>a les pedres</i>	<i>a las piedras</i>	individual architectural elements
<i>sentit</i>	<i>sentido</i>	meaning and theological purpose
<i>a l'edifici</i>	<i>al edificio</i>	the building as an integrated whole
<i>habitam junts</i>	<i>habitamos juntos</i>	communal inhabitation

These correspondences preserve the sentence's semantic organization almost completely. No principal concept is omitted, substituted or paraphrased. The transformation from individual stones into a meaningful building remains attributed to faith in both versions.

Emphatic focalization of faith

The Catalan sentence begins with the identifying construction: *És la fe que...* Spanish renders it with a more explicitly marked cleft construction: *Es precisamente la fe la que...* Two additions are significant: the focal adverb *precisamente*; the relative element *la que*.

The Spanish construction makes the identification of the agent syntactically more explicit: it is precisely faith that gives form and meaning. The insertion of *precisamente* excludes competing interpretations by emphasizing faith as the decisive principle. It may be paraphrased as “it is faith and specifically faith that gives form to the stones and meaning to the building.”

Catalan already focalizes *la fe* by placing it after the copular verb *És* and before the relative clause. Spanish does not introduce an emphasis absent from the source at the conceptual level; it reinforces an emphasis already encoded in the Catalan word order and construction.

Version	Focal construction	Degree of explicitness
Catalan	<i>És la fe que...</i>	contextual and syntactic focalization
Spanish	<i>Es precisamente la fe la que...</i>	overt lexical and syntactic focalization

The addition therefore represents **emphatic explicitation**. It does not alter the proposition but increases the rhetorical prominence of faith.

Faith as an active formative principle

Both versions present faith as the subject of the verb *donar/dar*. Faith is not described merely as an internal conviction held by those who enter the basilica. It performs two parallel actions: it gives form to the stones; it gives meaning to the building. The verb *dóna/da* governs both complements. Its repetition is avoided through ellipsis: *dóna forma a les pedres i [dóna] sentit a l'edifici; da forma a las piedras y [da] sentido al edificio*.

Spanish preserves this syntactic economy. The single verb coordinates two forms of transformation: material formation and semantic interpretation. Faith simultaneously shapes what is visible and reveals what the visible structure signifies.

The present-tense forms *dóna* and *da* present this action as continuing rather than completed. Faith does not belong solely to the historical origin of the basilica; it remains the principle through which the building acquires form and meaning in the present.

The parallelism of form and meaning

The sentence is organized around the conceptual pairing of *forma* and *sentit/sentido*:

Material dimension	Semantic dimension
<i>forma</i>	<i>sentit/sentido</i>
<i>pedres/piedras</i>	<i>edifici/edificio</i>
physical construction	theological interpretation

The first part concerns the basilica's material components: faith gives *form* to the *stones*. The second moves from matter to meaning: faith gives *meaning* to the *building*. This progression indicates that the basilica cannot be understood only through its physical structure. Its theological meaning depends upon the faith that inspired its construction and enables its ecclesial interpretation. Spanish preserves the parallelism exactly: *da forma a las piedras y sentido al edificio*. No additional verb separates the two parts. Consequently, form and meaning remain two complementary results of the same agency.

From individual stones to the complete building

The movement from *pedres/piedras* to *edifici/edificio* creates a progression from individual components to the integrated whole: stones constitute the material units; the building constitutes the organized structure; faith gives the units their form and the whole its meaning.

This relationship also connects the sentence with an earlier passage of the homily, where the church is described as “*a single building composed of many stones*” and the faithful as “*living stones*.” Within the verified textual context, the architectural vocabulary therefore functions simultaneously on literal and ecclesiological levels.

The stones refer directly to the material construction of the Sagrada Família, but the homily's internal metaphorical network also allows them to evoke the members of the ecclesial community. Similarly, the building is both the basilica and an image of the community gathered and built upon Christ. This ecclesiological interpretation arises from the surrounding homily rather than from an isolated lexical assumption.

Architecture and ecclesial identity

The sentence integrates three levels of meaning:

Level	Textual element	Interpretation
Material	stones and building	physical basilica
Hermeneutic	form and meaning	faith interprets architecture
Ecclesial	we inhabit together	community as shared dwelling

Faith connects all three levels. It inspires the material formation of the stones, discloses the meaning of the completed building and unites those who inhabit it. The basilica consequently becomes intelligible not only as an artistic achievement but as a material expression of ecclesial faith.

This does not eliminate the architectural meaning of the sentence. Rather, the literal and metaphorical levels coexist. The stones remain actual stones, and the building remains the Sagrada Família, but faith allows these material realities to communicate theological meaning.

3. Cases of Linguistic Adaptation between the Catalan and Spanish Texts

The comparison of the Catalan and Spanish passages reveals adaptation at the lexical, morphosyntactic, syntactic, pragmatic and discourse levels. Because Catalan and Spanish are closely related Romance languages, many segments display extensive formal similarity. This proximity, however, does not eliminate differences in clitic systems, preferred clause structures, lexical distribution, information structure and idiomatic usage. The Spanish text consequently reproduces the communicative content of the Catalan passages while occasionally reorganizing their linguistic form.

From a linguistic perspective, adaptation is understood here as a non-obligatory or partially obligatory shift through which the Spanish version modifies the structure, explicitness, lexical specificity, or pragmatic force of the corresponding Catalan expression. The category does not include predictable orthographic or morphological correspondences, such as *família–familia*, *pedres–piedras* or *ens–nos*. It concerns changes that affect how information is structured and presented.

Linguistic criteria for identifying adaptation

A difference is classified as adaptation only when it involves at least one of the following operations: Addition – Spanish verbalizes an element not formally present in Catalan. Reduction – Spanish condenses a Catalan analytic construction. Transposition – the grammatical category or clause type changes. Modulation – the same content is presented from a different lexical or semantic perspective. Explicitation – an implicit relationship becomes overt. Specification – Spanish uses a lexeme with a narrower contextual meaning. Focal restructuring – the distribution of emphasis or informational prominence changes. Cohesive restructuring – anaphoric reference is encoded through a different grammatical resource.

Routine interlingual correspondences are excluded from this category. For example, *dóna–da* involves regular verbal equivalence, while *fent-nos–haciéndonos* represents a predictable correspondence between gerundial constructions. These forms belong to fidelity at the morphosyntactic level rather than to adaptation.

Main levels of linguistic adaptation

Level	Type of shift	Example from the corpus
Morphosyntactic	replacement of a language-specific clitic	<i>en donen testimoni → lo atestiguan</i>
Syntactic	finite clause replaced by a non-finite construction	<i>que conviden → para invitar</i>

Lexical-semantic	selection of a more specialized equivalent	<i>Nadal</i> → <i>Natividad</i>
Referential	addition of an explicit possessive	<i>braços</i> → <i>sus brazos</i>
Information structure	reinforcement of focalization	<i>És la fe que</i> → <i>Es precisamente la fe la que</i>
Pragmatic-rhetorical	intensification of an assertion	addition of <i>precisamente</i>
Textual	modification of cohesion or punctuation	<i>a aquest altar a escoltar</i> → <i>a este altar, a escuchar</i>

Morphosyntactic adaptation

Catalan and Spanish differ significantly in their pronominal systems. Catalan possesses the adverbial clitics *en* and *hi*, which have no direct structural equivalents in standard Spanish. When Catalan *en* refers anaphorically to previously mentioned content, Spanish must employ a different cohesive mechanism.

This occurs in: Catalan: *Les tres façanes [...] en donen testimoni* Spanish: *Las tres fachadas [...] lo atestiguan*

Catalan *en* functions as a clitic complement associated with *donar testimoni de*. Spanish replaces it with the neuter accusative pronoun *lo*, which refers globally to the preceding proposition. The change is not merely lexical: it involves a restructuring of argument realization. Catalan encodes the complement through an adverbial clitic, whereas Spanish uses a neuter pronominal object.

At the same time, the analytic verbal phrase *donar testimoni* becomes the synthetic verb *atestiguar*. The semantic relation remains stable, but its grammatical encoding changes.

Syntactic transposition

Adaptation also occurs when the two versions express the same relation through different clause types: Catalan: *braços que conviden a cadascú* Spanish: *sus brazos para invitar a cada uno*

The Catalan relative clause *que conviden* contains a finite verb in the present indicative. Spanish replaces it with the prepositional infinitival construction *para invitar*. Catalan attributes the act of invitation directly to the metaphorical arms: they are arms “that invite.” Spanish presents invitation as the purpose of opening the doors: the basilica opens them “in order to invite.” The principal communicative content remains stable, but the syntactic hierarchy differs. Catalan foregrounds the characteristic activity of the arms, whereas Spanish foregrounds the purpose of the basilica’s action.

Referential explicitation

Spanish occasionally verbalizes a relation that remains implicit or contextually recoverable in Catalan: Catalan: *com si fossin braços* Spanish: *como si fueran sus brazos*
The possessive *sus* has no formally expressed counterpart in the Catalan phrase. Its addition identifies the metaphorical arms explicitly as belonging to the personified basilica. This is a case of referential explicitation: information recoverable from context in Catalan is encoded morphologically in Spanish. The Spanish version consequently strengthens the cohesion

between the grammatical subject *la Basílica* and the metaphorical noun *brazos*.

Lexical specification and register adjustment

Lexical adaptation appears when Spanish selects an equivalent with a different degree of specialization: Catalan: *Nadal* Spanish: *Natividad*

The most immediate everyday equivalent of *Nadal* is *Navidad*. The use of *Natividad* introduces a more specialized lexical item associated with the birth of Christ as a liturgical, theological and iconographic event. It also corresponds to the established Spanish designation *fachada de la Natividad*.

This shift can be classified as lexical specification because the Spanish term has a more restricted contextual distribution:

Lexeme	Range of use
<i>Nadal</i>	feast, liturgical period and cultural celebration
<i>Navidad</i>	common Spanish equivalent of Christmas
<i>Natividad</i>	birth as a religious, liturgical or iconographic event

The translation moves from a relatively general feast name to a lexeme more closely adapted to the architectural and religious context.

Adaptation of information structure

The difference between the following constructions concerns the organization of focus: Catalan: *És la fe que dóna forma...* Spanish: *Es precisamente la fe la que da forma...*

Both sentences identify *faith* as the agent, but Spanish marks this focalization more overtly. It introduces: the focus-sensitive adverb *precisamente*; the explicit cleft sequence *la fe la que*. The addition of *precisamente* further narrows the focus. It signals that the constituent *la fe* is not simply new information but the specifically selected element among possible alternatives. The Spanish version therefore strengthens contrastive or exclusive focalization.

This shift affects pragmatic force rather than propositional meaning. Both versions attribute the action to faith, but Spanish more explicitly instructs the recipient to interpret *faith* as the decisive agent.

Lexical modulation

Adaptation can also involve a change in lexical perspective without changing the referent. For example: Catalan: *una família estimada pel Senyor* Spanish: *una familia amada por el Señor*.

Spanish *estimada* would be formally closer to Catalan *estimada*, but its semantic range includes “esteemed,” “valued” and, in other contexts, “estimated.” The selection of *amada* activates the intended affective meaning more directly.

Adaptation of clause relations

Punctuation and clause segmentation can modify the interpretation of syntactic relations: Catalan: *en aquest altar a escoltar la Paraula de Déu* Spanish: *a este altar, a escuchar la Palabra de Dios*

The Spanish comma visually separates two infinitival complements. It encourages the reader to process them as consecutive or appositional components: first, the invitation to the altar; second, the invitation to listen to the Word of God.

The difference is minor, but it affects the rhythm and parsing of the sentence. Spanish makes the boundary between spatial direction and communicative action more perceptible.

Linguistic criteria for identifying adaptation

4. Conclusions

The comparative analysis demonstrates that the relationship between the Catalan and Spanish passages is characterized by substantial semantic, theological and rhetorical fidelity combined with limited linguistic adaptation. The Spanish rendering does not reproduce every Catalan structure mechanically. Instead, it preserves the principal meanings and images while adjusting selected elements to Spanish grammar, idiomatic usage, information structure and lexical register.

Fidelity

The Spanish text preserves the principal theological propositions.

The ecclesiological, Christological and Eucharistic meanings of the Catalan passages remain stable. The basilica welcomes the community, the three façades bear witness to Christ's saving mysteries, and faith gives form and meaning to the building.

The dominant metaphorical networks remain intact.

Spanish preserves the representation of the basilica as a welcoming person, its doors as arms, the assembly as a family, the stones as components of a shared building and the façades as witnesses to salvation history.

The Christological sequence is reproduced without omission.

The Spanish text maintains the progression from the Nativity through the Passion to eternal life and participation in divine glory.

The paradoxical structure of the Catalan text is maintained.

The oppositions between *Primer/Primero* and *darrer/último*, as well as between *mort/muerte* and *vida/vida*, are preserved. Spanish retains both their rhetorical force and their theological meaning.

Liturgical and theological terminology remains precise.

Expressions such as *Paraula de Déu–Palabra de Dios*, *Passió–Pasión*, *Eucaristia–Eucaristía*, *vida eterna* and *glòria divina–gloria divina* are reproduced through direct equivalents. The specialized register is not simplified or secularized.

Divine and Christological agency remains visible.

The Spanish version preserves Christ as the subject of the salvific actions and the community as their beneficiary. This relation is encoded through forms such as *por nosotros*, *nos redime*, *nos da* and *haciéndonos partícipes*.

The present-tense perspective is preserved

Forms such as *es fa-se hace*, *redimeix-redime*, *dóna-da* and *habitem-habitemos* present the theological realities as presently operative. Spanish retains the liturgical actualization of events that are historical but remain effective in the life of the community.

Fidelity operates primarily at the semantic and functional levels

The Spanish text reproduces what the Catalan passages communicate and the effects they create, even when their morphosyntactic structures are not identical. Fidelity in this corpus is therefore not reducible to formal correspondence.

Adaptation

Adaptation occurs principally at the level of linguistic expression

The identified changes affect clitics, clause types, lexical selection, referential explicitness and information structure. They rarely affect the underlying propositional content.

Some adaptations result from structural differences between Catalan and Spanish

The change from *en donen testimoni* to *lo atestiguan* reflects differences between the two pronominal systems. Catalan employs the adverbial clitic *en*, whereas Spanish uses the neuter pronoun *lo*.

Spanish sometimes condenses Catalan analytic constructions

Catalan *donen testimoni* becomes Spanish *atestiguan*. The Spanish version replaces an analytic verb-noun construction with a synthetic verb while preserving the meaning of testimony.

Finite clauses can be reorganized as non-finite constructions

The relative clause *braços que conviden* is rendered as the purposive infinitival construction *brazos para invitar*. This transposition changes the clause hierarchy: Catalan describes what the arms do, while Spanish foregrounds the purpose of opening them.

Spanish displays a tendency towards referential explicitation

In *com si fossin braços* → *como si fueran sus brazos*, the added possessive *sus* makes explicit that the metaphorical arms belong to the personified basilica. The referential relationship is implicit in Catalan but morphologically encoded in Spanish.

Lexical adaptation can increase semantic precision

Catalan *Nadal* is rendered as *Natividad* rather than *Navidad*. The Spanish term is more closely associated with the Christological mystery and the conventional name of the Nativity Façade. This represents contextual specification rather than a change in referent.

Adaptation can prevent misleading cognate equivalence

The rendering *família estimada* - *familia amada* avoids the broader and potentially evaluative meanings of Spanish *estimada*. The choice of *amada* activates the intended affective meaning more directly.

Spanish sometimes strengthens informational focus

The construction *És la fe que...* becomes *Es precisamente la fe la que...*. The adverb *precisamente* and the cleft structure *la fe la que* increase the prominence of faith as the agent.

Punctuation contributes to syntactic and pragmatic adaptation

The Spanish sequence *a este altar, a escuchar la Palabra de Dios* separates the spatial and communicative components more clearly than Catalan *en aquest altar a escoltar*. This affects processing and rhythm without introducing a new proposition.

Most adaptations support rather than weaken fidelity.

Explicitation, transposition and lexical specification generally help Spanish reproduce the contextual function of the Catalan passages. Adaptation therefore acts as an instrument of functional equivalence.

Principal linguistic findings

The analyzed differences can be classified as follows:

Mechanism	Catalan	Spanish	Effect
Referential explicitation	<i>braços</i>	<i>sus brazos</i>	clarifies metaphorical possession
Syntactic transposition	<i>que conviden</i>	<i>para invitar</i>	changes a relative clause into a purposive construction
Clitic restructuring	<i>en donen testimoni</i>	<i>lo atestiguan</i>	adapts anaphoric reference to the Spanish pronominal system
Lexical condensation	<i>donen testimoni</i>	<i>atestiguan</i>	replaces an analytic expression with a synthetic verb
Lexical specification	<i>Nadal</i>	<i>Natividad</i>	strengthens liturgical and architectural precision
Semantic disambiguation	<i>estimada</i>	<i>amada</i>	foregrounds affective meaning
Focal intensification	<i>És la fe que</i>	<i>Es precisamente la fe la que</i>	emphasizes faith as the decisive agent
Textual segmentation	no comma	added comma	clarifies the relation between coordinated actions

General conclusions

The analysis supports five general conclusions.

Firstly, the Spanish passages demonstrate a high degree of fidelity at the semantic level. Their central propositions, theological terminology, metaphorical structures and agent–recipient relations remain consistent with the Catalan text.

Secondly, formal correspondence is also extensive because Catalan and Spanish share a Romance linguistic foundation. Cognate vocabulary and similar syntactic resources allow many expressions to be reproduced closely. This proximity, however, does not eliminate the need for adaptation.

Thirdly, the most linguistically significant differences arise where Catalan employs resources that Spanish cannot reproduce directly, especially the clitic *en*, or where Spanish favors a different clause structure. These shifts are systemically motivated and cannot automatically be interpreted as deliberate theological reformulation.

Fourthly, optional adaptations tend to increase explicitness, precision or emphasis. The additions *sus* and *precisamente*, the choice of *Natividad*, and the focal structure *la fe la que* guide the Spanish recipient more overtly than their Catalan counterparts.

Fifthly, fidelity and adaptation function as complementary strategies. Fidelity preserves the semantic and rhetorical identity of the homily, whereas adaptation enables this identity to be expressed through natural and contextually appropriate Spanish forms.

Final answer to the research problem

The Catalan–Spanish comparison confirms that fidelity is located primarily in the preservation of meaning, function and discourse structure, while adaptation operates mainly in the linguistic mechanisms through which those elements are communicated.

The Spanish rendering remains faithful to the Catalan passages in their theological content, metaphorical organization, communal perspective and rhetorical progression. Adaptation appears mainly through grammatical restructuring, syntactic transposition, referential explicitation, lexical specification and focal intensification. These changes do not constitute a systematic departure from the Catalan text. They demonstrate that linguistic adaptation can serve fidelity by transferring the same communicative and theological function through resources characteristic of Spanish.

Bibliography:

Theological bibliography

1. Benedict XVI. (2010). *Verbum Domini: Post-synodal apostolic exhortation on the Word of God in the life and mission of the Church*. The Holy See.
2. Bouyer, L. (1967). *Liturgy and architecture*. University of Notre Dame Press.
3. Congregation for Divine Worship and the Discipline of the Sacraments. (2001). *Liturgiam authenticam: Fifth instruction for the right implementation of the Constitution on the Sacred Liturgy of the Second Vatican Council*. The Holy See.
4. Francis. (2017). *Magnum principium: Apostolic letter issued motu proprio by which canon 838 of the Code of Canon Law is modified*. The Holy See.
5. Kieckhefer, R. (2004). *Theology in stone: Church architecture from Byzantium to Berkeley*. Oxford University Press.
6. Kluj, W. (2013). *Kształtowanie się podstawowych tekstów wiary w języku malgaskim*. Wydawnictwo Missio-Polonia.
7. Paul VI. (1975). *Evangelii nuntiandi: Apostolic exhortation on evangelization in the modern world*. The Holy See.

9. Second Vatican Council. (1963). *Sacrosanctum Concilium: Constitution on the sacred liturgy*. The Holy See.
10. Second Vatican Council. (1964). *Lumen gentium: Dogmatic constitution on the Church*. The Holy See.
11. Second Vatican Council. (1965). *Dei Verbum: Dogmatic constitution on divine revelation*. The Holy See. Oxford University Press.
12. Kłuj, W. (2013). *Kształtowanie się podstawowych tekstów wiary w języku malgaskim*. Wydawnictwo Missio-Polonia.
13. Paul VI. (1975). *Evangelii nuntiandi: Apostolic exhortation on evangelization in the modern world*. The Holy See.
14. Second Vatican Council. (1963). *Sacrosanctum Concilium: Constitution on the sacred liturgy*. The Holy See.
15. Second Vatican Council. (1964). *Lumen gentium: Dogmatic constitution on the Church*. The Holy See.
16. Second Vatican Council. (1965). *Dei Verbum: Dogmatic constitution on divine revelation*. The Holy See.

Catalan and Spanish linguistics

17. Badia i Margarit, A. M. (1994). *Gramàtica de la llengua catalana: Descriptiva, normativa, diatòpica, diastràtica*. Enciclopèdia Catalana.
18. Bosque, I., & Demonte, V. (Eds.). (1999). *Gramática descriptiva de la lengua española* (Vols. 1–3). Espasa Calpe.
19. Brucart, J. M. (1999). *La estructura del sintagma nominal: Las oraciones de relativo*. In I. Bosque & V. Demonte (Eds.), *Gramática descriptiva de la lengua española* (Vol. 1, pp. 395–522). Espasa Calpe.
20. Cuenca, M. J. (2010). *Gramática del texto*. Arco Libros.
21. Cuenca, M. J., & Hilferty, J. (1999). *Introducción a la lingüística cognitiva*. Ariel.
22. Hualde, J. I. (1992). Catalan. Routledge.
23. Institut d'Estudis Catalans. (2018). *Gramàtica essencial de la llengua catalana*. Institut d'Estudis Catal
24. Real Academia Española, & Asociación de Academias de la Lengua Española. (2009). *Nueva gramática de la lengua española* (Vols. 1–2). Espasa.
25. Solà, J., Lloret, M. R., Mascaró, J., & Pérez Saldanya, M. (Eds.). (2002). *Gramàtica del català contemporani* (Vols. 1–3). Empúries.
26. Wheeler, M. W., Yates, A., & Dols, N. (1999). *Catalan: A comprehensive grammar*. Routledge.

Catalan–Spanish translation and languages in contact

27. Branchadell, A., & West, L. M. (Eds.). (2005). *Less translated languages*. John Benjamins. <https://doi.org/10.1075/btl.58>
28. García de Toro, C. (2004). *Traduir entre català i castellà: Un camp de treball per explorar*. Quaderns: Revista de Traducció, 11, 151–158.
29. García de Toro, C. (2009). *La traducción entre lenguas en contacto: Catalán y español*. Peter Lang. ISBN 978-3-03911-493-1.

29. Payrató, L. (1985). *La interferència lingüística: Comentaris i exemples català-castellà*. Curial Edicions Catalanes; Publicacions de l'Abadia de Montserrat.

Linguistic translation studies

30. Baker, M. (1995). *Corpora in translation studies: An overview and some suggestions for future research*. *Target*, 7(2), 223–243. <https://doi.org/10.1075/target.7.2.03bak>
31. Baker, M. (2018). *In other words: A coursebook on translation (3rd ed.)*. Routledge.
- Blum-Kulka, S. (1986). *Shifts of cohesion and coherence in translation*. In J. House & S.
32. Blum-Kulka (Eds.), *Interlingual and intercultural communication: Discourse and cognition in translation and second language acquisition studies (pp. 17–35)*. Gunter Narr.
33. Catford, J. C. (1965). *A linguistic theory of translation: An essay in applied linguistics*. Oxford University Press.
34. Chesterman, A. (2016). *Memes of translation: The spread of ideas in translation theory (Rev. ed.)*. John Benjamins. <https://doi.org/10.1075/btl.123>
35. House, J. (2015). *Translation quality assessment: Past and present*. Routledge. Munday, J., Ramos Pinto, S., & Blakesley, J. (2022). *Introducing translation studies: Theories and applications (5th ed.)*. Routledge.
36. Toury, G. (2012). *Descriptive translation studies and beyond (Rev. ed.)*. John Benjamins. <https://doi.org/10.1075/btl.100>.

16. TRANSLATIONS AND INTERPRETATIONS OF THE CONCEPT OF FAITH AMONG FILIPINO MIGRANTS IN POLAND?

Stanisław Schabowicz

PhD Student in Theology

Faculty of Theology Cardinal Stefan Wyszyński University in Warsaw, Poland

PhD Student in Spanish:

Linguistics, Literature and Communication Department of Spanish Language,

University of Valladolid, Spain

<https://orcid.org/my-orcid?orcid=0000-0002-1140-230X>

1. Introduction

Migration involves more than the physical movement of individuals between geographical locations. It also brings languages, conceptual systems, religious traditions, and culturally established forms of expression into contact. Migrants entering a new linguistic environment encounter not only unfamiliar vocabulary but also different ways of categorising and interpreting realities that may have previously appeared self-evident. This process becomes particularly significant in the case of religious concepts because their meanings combine linguistic convention, theological doctrine, cultural memory, communal practice, and personal experience.

The present study examines this problem through the concept of faith in the context of Filipino migration to Poland. Filipino migrants can function within a multilingual environment involving a Philippine regional language, Filipino largely based on Tagalog English, and Polish. The transition between these languages cannot be represented as a simple replacement of one term by another. Each language organises the semantic domain of faith through a distinct network of partially overlapping expressions.

The principal terms considered in the study are:

Tagalog/Filipino	English	Polish
<i>pananampalataya</i>	<i>faith</i>	<i>wiara</i>
<i>paniniwala</i>	<i>belief</i>	<i>przekonanie, wierzenie</i>
<i>tiwala</i>	<i>trust</i>	<i>zaufanie</i>
<i>pagtitiwala</i>	<i>trust, reliance, entrustment</i>	<i>ufność, zaufanie, zawierzenie</i>
<i>sumampalataya</i>	<i>to believe, to have faith</i>	<i>wierzyć</i>
<i>maniwala</i>	<i>to believe</i>	<i>wierzyć, uznawać za prawdziwe</i>
<i>magtiwala</i>	<i>to trust</i>	<i>ufać, zaufać</i>

These correspondences provide an initial orientation, but they do not establish complete semantic equivalence. Tagalog/Filipino, English, and Polish distribute the cognitive, relational, doctrinal, and performative dimensions of faith differently. The translation of a term may preserve its general religious reference while modifying the specific way in which faith is conceptualised.

For example, Tagalog/Filipino *pananampalataya*, English *faith*, and Polish *wiara* can all denote religious faith. Nevertheless, *pananampalataya* belongs to a lexical network that includes *paniniwala* and *tiwala*, whereas *wiara* interacts with *przekonanie*, *zaufanie*, *ufność*, and *zawierzenie*. The semantic structure of the concept therefore emerges not only from the principal term but also from its relationships with neighbouring lexical units.

The topic has a concrete social and ecclesial context. Wanicka and Patzer (2024) document Filipino labour migration to Poland, while Alcover (2025) describes the Rogationists' pastoral ministry among Filipino migrants living in the country. These studies confirm the existence of a Filipino migrant population and organised forms of religious ministry in Poland. They do not, however, provide a systematic linguistic analysis of how the concept of faith is translated or interpreted within Filipino–English–Polish communication.

The present research addresses this gap from a linguistic, translation-studies, and theological perspective.

Formulation of the research problem

The research problem arises from the discrepancy between the apparent simplicity of lexical correspondence and the actual complexity of religious meaning. At first sight, the following equivalence appears unproblematic:

pananampalataya = *faith* = *wiara*.

This equation is useful at the level of general reference. All three terms can designate religious faith. It becomes insufficient, however, when the analysis considers: the acceptance of a proposition as true; personal trust in God; reliance on divine assistance; adherence to a religious doctrine; public profession of faith; membership in a religious tradition; the deliberate act of entrusting oneself to God.

These components are not lexicalised identically in the three languages. The translation of *pananampalataya* as *faith* and subsequently as *wiara* may preserve the broad religious meaning while leaving the relational dimension implicit. Conversely, translating a source term through *trust*, *tiwala*, or *zaufanie* may foreground personal reliance while obscuring the doctrinal meaning of faith.

Title and scope of the study

The use of the expression *among Filipino migrants* requires methodological clarification. The study does not reconstruct the individual experiences, opinions, or linguistic behaviour of Filipino migrants through direct fieldwork. It investigates the linguistic and textual resources potentially available in religious communication involving this community. The study establishes: how the concept of faith is organised in the three languages; which lexical units form the relevant semantic fields; where full correspondence is absent; how religious texts stabilise particular meanings; which semantic shifts can arise in translation; how these shifts can become relevant in a migratory context.

The main purpose of the article is: to analyse the linguistic and theological meanings of the concept of faith in Tagalog/Filipino, English, and Polish and to determine how translation between these languages can influence its interpretation in the context of Filipino migration to Poland.

The study adopts an interdisciplinary qualitative methodology combining lexical semantics, contrastive linguistics, translation studies, theological hermeneutics, and migration-oriented discourse interpretation. The analytical framework draws on the work of Cruse (1986), Geeraerts (2010), Lehrer (1974), Wierzbicka (1992, 1996), and Goddard and Wierzbicka (2014). The analysis does not assume that English categories are universal. Tagalog/Filipino and Polish terms are examined within their own lexical systems before cross-linguistic equivalences are proposed.

Translation analysis draws on the concepts of formal correspondence, dynamic equivalence, functional equivalence, purpose, and translator mediation developed by Nida (1964), Nida and Taber (1969), de Waard and Nida (1986), Baker (2018), Nord (2018), and Munday, Ramos Pinto, and Blakesley (2022).

The results of the linguistic comparison are interpreted in the context of Filipino migration to Poland. This stage concerns: multilingual communication; relay translation through English; acquisition of Polish religious vocabulary; pastoral communication; participation in Polish parish life; maintenance of inherited religious language; possible forms of code-switching and translanguaging. This method does not transform theoretical possibilities into empirical facts. It identifies linguistically motivated areas for further fieldwork.

The research material consists of four categories of sources.

Lexicographic material includes:

- the *KWF Diksiyonaryo ng Wikang Filipino*;
- Leo James English's *Tagalog-English Dictionary*;
- monolingual English dictionaries;
- monolingual Polish dictionaries;
- specialised theological dictionaries, where relevant.

Dictionary data are used to identify semantic possibilities, not to determine the meaning of every textual occurrence.

The principal theological sources include:

- *Catechism for Filipino Catholics*;
- *Katesismo para sa mga Pilipinong Katoliko*, if the examined Filipino text and edition are clearly identified;
- *Catechism of the Catholic Church*;
- *Dei Verbum*;
- *Lumen fidei*;
- documents concerning intercultural migrant ministry.

2. Faith as a multidimensional linguistic concept

Faith constitutes a difficult object of analysis because it simultaneously belongs to everyday language, religious discourse, philosophy, theology, liturgy, and personal experience. Depending on the context, the word can refer to: acceptance of a statement as true; personal trust in another; recognition of divine truthfulness; adherence to religious doctrine; participation in a religious tradition; profession; existential commitment; confidence directed towards the future.

The English noun *faith* demonstrates this polysemy in expressions such as: *faith in God; the Catholic faith; an article of faith; profession of faith; to lose faith; to act in good faith*.

The same lexical form activates different meanings according to its collocations and genre. In theological discourse, *faith* normally occupies a central position, while *belief* and *trust* clarify its cognitive and relational components.

Polish *wiara* has a similarly broad semantic range. It may denote religious faith, the content of belief, trust, a religion, or a personal conviction. Polish nevertheless contains a more differentiated group of neighbouring terms: *przekonanie* – conviction; *wierzenie* – a belief treated as content; *zaufanie* – relational trust; *ufność* – sustained confidence; *zawierzenie* – a deliberate act of entrustment.

Tagalog/Filipino distributes this domain among: *pananampalataya* – religious faith; *paniniwala* – belief or conviction; *tiwala* – trust; *pagtitiwala* – the act or disposition of trusting.

The concept is therefore multidimensional in all three languages, but its internal boundaries are not identical.

Faith, belief, trust, and entrustment

The analysis distinguishes four principal semantic dimensions.

Propositional belief concerns the acceptance of a statement as true:

X believes that P.

English normally employs *believe that*, Polish *wierzyć, że*, and Tagalog/Filipino a construction related to *paniwala*. In religious discourse, this dimension concerns acceptance of revealed truths.

Personal trust concerns a relation between subjects:

X trusts Y.

English employs *trust*, Polish *ufać* or *zaufać*, and Tagalog/Filipino forms based on *tiwala*. The object is not primarily a proposition but a person recognised as trustworthy.

Religious adherence unites belief, trust, and commitment. English *faith*, Polish *wiara*, and Filipino *pananampalataya* normally function as the principal terms in this domain.

Entrustment presents faith as an intentional act:

X entrusts X or Z to Y.

Polish *zawierzenie* profiles this act explicitly. English employs *entrustment* or a verbal construction with *entrust*. Tagalog/Filipino can employ contextual constructions based on *tiwala* or *pagtitiwala*, but the exact correspondence depends on the source text.

These dimensions can be represented as follows:

Dimension	Semantic relation	English	Polish	Tagalog/Filipino
propositional	X believes that P	<i>belief</i>	<i>przekonanie, wierzenie</i>	<i>paniniwala</i>
relational	X trusts Y	<i>trust</i>	<i>zaufanie, ufność</i>	<i>tiwala</i>
religious	X believes in God	<i>faith</i>	<i>wiara</i>	<i>pananampalataya</i>
performative	X entrusts the self to Y	<i>entrustment</i>	<i>zawierzenie</i>	contextual use of <i>pagtitiwala</i>

Lexical meaning and theological meaning

Theological meaning concerns the function assigned to a term within a doctrinal system. The *Catechism of the Catholic Church* describes faith as the human response to God's revelation and connects it with personal adherence and free assent to revealed truth. *Dei Verbum* 5 similarly presents faith as the free commitment of the whole person to God, including the submission of intellect and will.

The Catholic concept therefore combines: God as the one who reveals; revelation as communicated content; the human person as recipient; assent to the truth revealed; trust in the revealing God; commitment of the self; grace enabling the response.

A translation limited to intellectual conviction reduces the relational dimension. A translation limited to emotional trust reduces the cognitive and doctrinal dimension. Theologically adequate translation requires the preservation of their relationship.

Faith can refer both to the act by which an individual believes and to the content professed by the Church. The traditional distinction between *fides qua creditur* and *fides quae creditur* clarifies this duality: *fides qua creditur* – the faith by which one believes; *fides quae creditur* – the faith that is believed.

This distinction is linguistically important because the same word can refer to: a personal act; a stable disposition; doctrinal content; a public confession; a religious community.

The contrast between *I believe* and *we believe* additionally distinguishes personal appropriation from ecclesial confession. A migrant entering a new linguistic environment may encounter the same Catholic doctrine expressed through unfamiliar formulas. The continuity of doctrine does not eliminate the linguistic work required to recognise, interpret, and appropriate these formulas.

The concepts and linguistic worldview

Following Wierzbicka (1992, 1996), culturally significant words cannot be treated as universal conceptual containers merely carrying different labels. Their meanings include culture-specific configurations and presuppositions. This principle is particularly relevant when English functions as an intermediary language. English categories cannot automatically serve as a neutral analytical standard. The relation:

Filipino → English → Polish

must be investigated at every stage. English *faith* may preserve the central religious meaning of *pananampalataya*, but a Filipino form related to *tiwala* can be translated as either *trust* or *faith*. The choice affects whether Polish receives *zaufanie*, *ufność*, or the more general *wiara*.

Migration creates a communicative environment in which linguistic differences become socially and religiously relevant. Filipino migrants in Poland can encounter Polish terminology in: liturgy; homilies; parish announcements; catechesis; sacramental preparation; religious publications; prayer groups; informal conversations; institutional communication.

They may also retain Filipino, English, Taglish, or regional Philippine languages in private and community religious practices.

The contact between languages can produce several processes: initial lexical transfer; semantic restructuring; code-switching; relay translation; functional differentiation of

languages; preservation of inherited formulas; acquisition of Polish religious vocabulary; multilingual reinterpretation.

The study does not present these processes as universally documented among Filipino migrants. It identifies them as theoretically motivated mechanisms whose empirical distribution remains open to further research.

3. The Potential Influence of Linguistic and Translational Processes on Filipino Migrants in Poland

3.1. Scope and methodological status of the analysis

The theoretical approaches discussed in Chapters 1 and 2 indicate that the translation of *faith* involves more than the substitution of one lexical item for another. The contact between Tagalog/Filipino *pananampalataya*, English *faith*, and Polish *wiara* brings together partially overlapping semantic fields, distinct grammatical structures, and culturally established forms of religious discourse. This chapter examines how these linguistic and translational mechanisms can operate in the lives of Filipino migrants in Poland. It does not claim that every Filipino migrant experiences the processes described below. Such a claim would require interviews, questionnaires, participant observation, recordings of authentic interaction, or a corpus of texts produced by Filipino communities in Poland.

3.2. Filipino migrants as users of multilingual repertoires

The inadequacy of a bilingual model

The linguistic situation of Filipino migrants in Poland cannot be adequately represented as a simple opposition between Tagalog and Polish. Such a model disregards the multilingual structure of Philippine society and the importance of English in education, administration, professional communication, media, and transnational mobility.

A more accurate theoretical model includes at least four components: a Philippine regional or first language; Filipino, largely based on Tagalog; English; Polish.

A Filipino migrant's linguistic repertoire may therefore involve Cebuano, Ilocano, Hiligaynon, Waray or another Philippine language alongside Filipino and English. The category "*Filipino migrant*" does not identify a homogeneous first-language community.

Consequently, the translational trajectory of a religious concept can assume different forms: regional Philippine language → Filipino → English → Polish; regional Philippine language → English → Polish; Filipino → English → Polish; Filipino → Polish; English → Polish.

These trajectories do not have the same semantic consequences. Each additional intermediary language introduces another stage of interpretation.

Repertoire rather than separate language systems

The concept of a linguistic repertoire provides a more suitable framework than the assumption that multilingual speakers activate entirely separate and autonomous systems. Migrants can select and combine linguistic resources according to: interlocutor; institutional

setting; communicative purpose; emotional involvement; topic; perceived competence; religious genre.

A person may know a catechetical definition in English, pray in a Philippine regional language, participate in a Polish liturgy, and discuss religious experience in Taglish. These practices would not constitute contradictory religious identities. They would represent the functional distribution of linguistic resources.

Theories of translanguaging describe multilingual communication as the flexible use of an integrated repertoire rather than the mechanical alternation of entirely isolated codes (García & Li Wei, 2014). In the present study, this theory provides a model for analysing how religious meaning can be assembled from forms belonging to Filipino, English and Polish.

It does not establish that Filipino migrants in Poland actually use translanguaging in a particular way. It identifies a process that can be investigated in future empirical research.

English as a linguistic bridge and semantic filter

English can facilitate communication between Filipino migrants and Polish institutions, employers, clergy, volunteers, and members of international communities. In Catholic settings, it can also function as an accessible language for liturgy, catechesis, prayer meetings, and pastoral information.

The bridging function of English can reduce the immediate communicative distance between Filipino and Polish speakers. A migrant does not need to acquire advanced Polish before participating in every form of religious communication if English-language pastoral resources are available.

At the same time, English does not operate as a semantically transparent channel. It organises the field of faith through the distinctions between: *faith*; *belief*; *trust*; *confidence*; *reliance*; *commitment*; *entrustment*.

The English term selected at the intermediary stage can influence the final Polish translation. A semantic filter does not necessarily falsify the source concept. It selects and foregrounds particular components.

Consider the following possible sequences:

Tagalog/Filipino form	English mediation	Polish result	Potential semantic effect
<i>pananampalataya</i>	<i>faith</i>	<i>wiara</i>	broad religious equivalence
<i>paniniwala</i>	<i>belief</i>	<i>wiara</i>	possible religious specification of a broader conviction
<i>paniniwala</i>	<i>belief</i>	<i>przekonanie</i>	preservation of the propositional dimension
<i>tiwala</i>	<i>trust</i>	<i>zaufanie</i>	preservation of relational meaning
<i>tiwala</i>	<i>faith</i>	<i>wiara</i>	weakening of explicit relational trust
<i>pagtitiwala</i>	<i>entrustment</i>	<i>zawierzenie</i>	strengthening of the performative and devotional dimension
<i>pagtitiwala</i>	<i>trust</i>	<i>ufność</i>	emphasis on sustained reliance

The effect depends on the complete utterance, not on the isolated term. Nevertheless, the table demonstrates how English can influence the semantic direction of the final Polish expression. Relay translation produces a process of double interpretation: the Filipino

expression is interpreted through an English category; the English expression is interpreted through a Polish category.

For example: *pagtitiwala sa Diyos* → *faith in God* → *wiara w Boga*.

The final Polish expression is theologically acceptable, but the explicit profile of trusting can become less visible. A different trajectory: *pagtitiwala sa Diyos* → *trust in God* → *zaufanie Bogu* or *ufność pokładana w Bogu*

makes the relational component more explicit. Neither solution is universally superior. The adequate form depends on whether the source context foregrounds religious adherence, confidence, reliance, or an intentional act of entrustment.

Acquisition of Polish religious vocabulary

When acquiring a new language, a multilingual speaker may initially connect an unfamiliar word with the nearest known equivalent. A Filipino learner encountering Polish *wiara* can associate it with English *faith* and Filipino *pananampalataya*: *wiara* = *faith* = *pananampalataya*.

This initial equation is communicatively useful. It enables the learner to recognise the general subject of a statement, understand basic liturgical formulas, and identify Catholic doctrinal vocabulary.

However, the equation remains incomplete. Polish *wiara* extends into contexts that may require different terms in English or Filipino. Its exact interpretation depends on construction and collocation.

As competence in Polish develops, the learner can reorganise the initial equivalence by adding further distinctions: *wiara* – religious faith or belief; *przekonanie* – conviction; *wierzenie* – belief considered as content; *zaufanie* – relational trust; *ufność* – confident reliance; *zawierzenie* – deliberate entrustment.

This process is not simply the memorisation of new vocabulary. It represents a restructuring of semantic relations. The learner begins to recognise that Polish encodes several components of the field through lexemes that do not correspond perfectly to the previously known English or Filipino divisions.

Positive transfer

Previously acquired languages can assist the interpretation of Polish religious terminology. Positive transfer occurs when the known category corresponds sufficiently closely to the new expression.

Examples include: *pananampalataya* and *faith* facilitating the recognition of *wiara*; *tiwala* and *trust* facilitating the acquisition of *zaufanie*; *paniniwala* and *belief* facilitating the understanding of *przekonanie*; *magtiwala* and *to trust* facilitating the acquisition of *ufać*.

Positive transfer reduces the cognitive effort required to enter Polish religious discourse.

Negative transfer

Negative transfer occurs when the speaker applies a known semantic or grammatical pattern in a context where Polish organises meaning differently.

Potential areas include: using *wiara* wherever English has *belief*; interpreting *wierzyć Bogu* and *wierzyć w Boga* as identical constructions; failing to distinguish *wierzyć* from *ufać*;

treating *zaufanie* and *zawierzenie* as stylistically equivalent; understanding *wyznanie wiary* as a private opinion rather than a liturgical or ecclesial confession; interpreting *prawdy wiary* as personal beliefs rather than doctrinal content.

These are predicted areas of cross-linguistic influence. They are not documented errors made by a specific group of Filipino migrants.

The grammatical profiling of faith in Polish

Polish religious vocabulary presents difficulties that cannot be solved through lexical equivalence alone. Grammatical complementation contributes directly to meaning. The most important contrast involves the constructions:

Polish construction	Grammatical structure	Dominant interpretation
<i>wierzyć, że Bóg istnieje</i>	subordinate clause	propositional belief
<i>wierzyć w Boga</i>	w + accusative	faith in God
<i>wierzyć Bogu</i>	dative	recognition of God's truthfulness
<i>ufać Bogu</i>	dative	personal reliance on God
<i>pokładać ufność w Bogu</i>	w + locative	sustained confidence
<i>zawierzyć Bogu</i>	dative	entrust a matter or oneself to God
<i>zawierzyć siebie Bogu</i>	direct object + dative	explicit self-entrustment

For a learner who knows English, several of these constructions may initially correspond to *believe in God*, *believe God*, *trust God*, or *entrust oneself to God*. Tagalog/Filipino distributes comparable meanings between forms related to *sampalataya*, *paniwala*, and *tiwala*.

The Polish case system therefore becomes a carrier of theological differentiation. The contrast between *wierzyć w Boga* and *wierzyć Bogu* is simultaneously grammatical and semantic. Polish verbal aspect can also affect the representation of faith:

- *wierzyć* presents an ongoing state or disposition;
- *uwierzyć* presents an entry into belief or a completed change;
- *ufać* describes continuing trust;
- *zaufać* profiles the act of beginning to trust or placing trust;
- *zawierzać* can present repeated or continuing entrustment;
- *zawierzyć* profiles a bounded act of entrustment.

A Filipino migrant familiar with Tagalog verbal morphology may already possess linguistic resources for distinguishing completed, ongoing and contemplated events. However, Tagalog and Polish do not grammaticalise temporal and aspectual relations in the same manner. Similarity in function does not imply formal correspondence.

The acquisition of Polish religious discourse therefore involves learning not only that *pananampalataya* corresponds to *wiara*, but also how Polish represents: the state of believing; the beginning of faith; the continuation of trust; the completed act of entrustment; the loss and recovery of faith. Catholic doctrinal language frequently employs abstract nouns: *wiara*; *ufność*; *zawierzenie*; *wyznanie*; *posłuszeństwo wiary*.

Pastoral and interpersonal communication may favour verbal forms: *wierzyć*; *ufać*; *zawierzyć*; *wyznać*; *trwać w wierze*.

For migrant recipients, a verbal formulation can sometimes make participant relations more explicit. Compare: *wiara jako odpowiedź człowieka na objawienie* with: *człowiek odpowiada Bogu, wierząc Mu i powierzając Mu siebie*.

The second formulation specifies the acting person, the recipient of trust, and the act of self-entrustment. Such explicitation can assist comprehension without replacing the established doctrinal noun *wiara*.

Influence on the interpretation of Catholic doctrine

Polish and Filipino Catholics participate in the same Catholic doctrinal tradition, but they receive and express that tradition through different linguistic forms. Shared doctrine does not create complete semantic identity between translations. Conversely, lexical differences do not necessarily imply doctrinal disagreement.

The distinction is fundamental: linguistic variation $\neq$ theological contradiction.

The relevant question concerns the way different linguistic forms profile particular dimensions of a shared theological concept. The Catholic account of faith integrates: divine revelation; the human response; free assent; personal adherence to God; acceptance of revealed truth; grace; ecclesial profession; practical commitment.

Tagalog/Filipino, English and Polish can express all these components, but they distribute them across different lexical and grammatical constructions.

The risk of cognitive reduction

If Polish *wiara* is interpreted solely through *paniniwala* or English *belief*, faith can be understood primarily as the acceptance of propositions. The relational components of trust, obedience and self-commitment then become less visible. This reduction could be represented as: faith $\rightarrow$ belief that religious statements are true. Such an interpretation remains incomplete in relation to the Catholic understanding expressed in *Dei Verbum* 5 and the *Catechism of the Catholic Church* 142–150. These texts connect assent to revealed truth with personal adherence to God.

The opposite reduction occurs when faith is interpreted exclusively through *tiwala*, *trust*, or *zaufanie*. Faith then becomes personal reliance without sufficient reference to the content of revelation and ecclesial confession. The reduction can be represented as: faith $\rightarrow$ confidence that God will help.

Trust belongs to faith, but it does not exhaust its doctrinal and cognitive dimensions. Polish expressions such as *wyznawać wiarę katolicką* or *należać do wspólnoty wiary* can foreground communal and confessional identity. If faith is interpreted mainly as membership in a religious institution, the personal act of believing becomes less visible.

The reduction takes the form: faith $\rightarrow$ religious affiliation.

Religious affiliation is sociologically relevant, but theological faith cannot be identified exclusively with formal membership.

Integrated interpretation

An integrated interpretation preserves the relationship between four dimensions:

Dimension	Central formulation
cognitive	I accept what God reveals

relational	I trust the God who reveals
performative	I entrust myself to God
ecclesial	I receive and profess faith within the community

The multilingual comparison can strengthen rather than weaken theological understanding. Filipino terms related to *tiwala* highlight trust, *pananampalataya* stabilises the religious category, English differentiates *faith*, *belief*, and *trust*, while Polish *zawierzenie* makes existential entrustment particularly explicit.

In this sense, contact between languages can produce conceptual enrichment when differences are recognised and explained.

Influence on prayer and religious experience

A prayer learned in childhood can preserve emotional associations that are not automatically transferred into another language. Even when a migrant understands the Polish version, a Filipino or regional-language prayer may remain more closely connected with: family memory; local devotional practices; familiar rhythm and sound; communal belonging; personal experiences of consolation or crisis.

This difference does not indicate incomplete acquisition of Polish. It reflects the affective function of language. Semantic comprehension and emotional resonance constitute separate, although interconnected, dimensions.

Formulaic language

Religious discourse contains fixed or semi-fixed formulas: professions of faith; liturgical responses; biblical acclamations; invocations; devotional expressions; acts of trust; formulas of entrustment. Formulaic expressions are frequently processed and remembered as complete units. Their translation may preserve doctrinal meaning while altering rhythm, register, emotional intensity, or associations.

A Filipino migrant participating in Polish liturgy may therefore experience several simultaneous processes: recognition of a familiar ritual structure; acquisition of a new linguistic formula; comparison with an English or Filipino version; gradual association of the Polish form with the familiar religious act.

These stages constitute a theoretical model of liturgical language acquisition. Their presence and sequence require empirical verification.

Private and communal prayer

Different languages can acquire specialised functions:

Religious activity	Possible linguistic preference
spontaneous private prayer	first or emotionally dominant language
memorised childhood prayer	language in which it was learned
international prayer meeting	English
Filipino community celebration	Filipino, English or a regional language
Polish parish liturgy	Polish
theological reading	English, Filipino or Polish, depending on competence

This distribution cannot be treated as a factual description of all migrants. It provides a set of research variables for future interviews and observations.

Influence on ecclesial belonging

Learning Polish religious language can facilitate access to: parish announcements; sacramental preparation; homilies; catechesis; prayer groups; religious publications; informal communication with Polish parishioners; local ecclesial structures.

In this sense, the acquisition of Polish theological vocabulary can contribute to participation in the receiving Church.

Participation through English or Filipino

English- or Filipino-language pastoral ministry can preserve intelligibility during the initial stages of migration. It can also provide a space in which religious identity, cultural memory and community support remain accessible.

Alcover's study confirms the existence of Rogationist ministry among Filipino migrants in Poland and describes its spiritual, evangelising and human-support dimensions. This constitutes evidence of a pastoral environment specifically related to Filipinos. It does not, however, provide sufficient linguistic data to determine the detailed distribution of Filipino, English and Polish within that ministry. Three general models can be distinguished.

Linguistic assimilation: Polish becomes the exclusive legitimate language of religious participation. This model facilitates institutional uniformity but can marginalise inherited religious forms.

Linguistic separation: Filipino migrants participate almost exclusively in linguistically separate communities. This model preserves comprehension and identity but can limit sustained contact with local Polish communities.

Intercultural integration: Polish, English and Philippine languages perform complementary functions. The model combines participation in the local Church with the preservation of inherited religious resources.

The 2022 *Pastoral Orientations on Intercultural Migrant Ministry* emphasise encounter, listening, communion and the active inclusion of migrants. Although the document is pastoral rather than sociolinguistic, its intercultural orientation supports a model in which migrant languages are interpreted as resources for ecclesial participation rather than as obstacles requiring removal.

Translanguaging in religious communication

Translanguaging refers to the flexible mobilisation of multilingual resources within communication. In a religious setting, it can involve: a prayer introduced in English and completed in Filipino; a Polish theological term explained through English; a Filipino devotional expression embedded in a Polish utterance; alternation between languages during testimony; comparison of several Bible translations; bilingual or trilingual catechetical materials. The theological meaning is then constructed across languages rather than contained entirely within one code.

Code-switching may perform identifiable discourse functions:

Function	Possible example
clarification	explaining Polish <i>zawierzenie</i> through English <i>entrustment</i>
emotional intensification	shifting to a first language in personal prayer

quotation	reproducing a Polish liturgical formula
identity marking	using a Filipino devotional expression
doctrinal precision	selecting the language in which a catechetical definition is best known
inclusion	translating a key expression for another participant

Bautista's analysis of Tagalog-English code-switching demonstrates that Taglish can function as a structured mode of discourse rather than random linguistic mixing. Its specific use among Filipino migrants in Poland nevertheless remains an empirical question.

The presence of three languages can enable conceptual triangulation. A speaker or translator can compare several lexical perspectives: *pananampalataya* – *faith* – *wiara*; *paniniwala* – *belief* – *przekonanie*; *tiwala* – *trust* – *zaufanie*; *pagtitiwala* – *reliance/entrustment* – *ufność/zawierzenie*.

Triangulation reveals semantic components that remain less visible in a bilingual comparison. It can therefore function as an analytical and educational resource.

Potential misunderstandings in pastoral communication

The theoretical comparison identifies several areas in which communication may require additional clarification. Polish *wierzę, że* can express both religious faith and personal supposition. A learner may not immediately distinguish theological belief from epistemic uncertainty. Polish *wiara w Boga* can include trust, but it does not lexicalise trust as explicitly as *zaufanie Bogu*. Translation through the general term *faith* can leave this distinction implicit. The expression *zmienić wiarę* normally refers to changing one's religion or confession, not merely modifying a personal conviction. A direct interpretation through *belief* may obscure the institutional meaning. Polish *wyznanie wiary* refers to the public or liturgical profession of belief. The noun *wyznanie* can also mean a religious denomination, while the verb *wyznać* can mean to confess, declare or admit. Context determines the intended sense. Polish *zawierzenie* is frequent in specific forms of Catholic spirituality, including prayers of entrustment to God or to Mary. An English translation limited to *faith* may omit its performative character. Filipino translation requires a construction that clearly expresses the act of entrusting rather than belief alone. These are points of semantic vulnerability, not evidence of actual communicative failure.

Possible positive effects of multilingual contact

The contact between Filipino, English and Polish can produce more than semantic loss. It can expand the speaker's conceptual repertoire. Encountering several terms can draw attention to distinctions previously left implicit: belief versus trust; faith in God versus believing God; continuing trust versus a completed act of entrustment; subjective faith versus doctrinal content.

The semantic resources of different languages can illuminate complementary dimensions of faith: *pananampalataya* foregrounds established religious faith; *paniniwala* identifies belief or conviction; *tiwala* foregrounds relational trust; *faith* connects religious adherence and confidence; *wiara* unites personal, doctrinal and confessional dimensions; *zawierzenie* foregrounds the deliberate act of entrustment. Multilingual comparison can prevent reduction of faith to one semantic component.

The acquisition of Polish religious terminology can enable participation in local Church life, while continued use of Filipino or regional languages can preserve continuity with inherited religious traditions. English can connect these domains.

This arrangement can be described as additive multilingualism: the new language expands the religious repertoire without necessarily replacing the previously used languages.

Operational hypotheses for future research

The theoretical analysis leads to several hypotheses that can later be tested empirically.

Hypothesis 1

English functions as the principal mediating language between Filipino and Polish religious terminology for at least some Filipino migrants in Poland.

Hypothesis 2

The Polish noun *wiara* is initially associated with English *faith* more frequently than directly with Tagalog/Filipino *pananampalataya*.

Hypothesis 3

The distinction between Polish *wierzyć*, *ufać*, and *zawierzyć* requires greater interpretative effort than the basic acquisition of *wiara*.

Hypothesis 4

Filipino migrants differentiate languages according to religious domains, using different linguistic resources for private prayer, community worship and participation in Polish parish life.

Hypothesis 5

Religious formulas learned in a Philippine language retain a stronger affective value than their later Polish equivalents.

Hypothesis 6

Trilingual explanation produces a more precise understanding of the concept of faith than reliance on English–Polish equivalence alone.

Hypothesis 7

Pastoral communication that distinguishes *faith*, *belief*, *trust*, *pananampalataya*, *paniniwala*, *tiwala*, *wiara*, *zaufanie*, and *zawierzenie* reduces semantic ambiguity.

These propositions remain hypotheses until verified through authentic linguistic data.

3. Conclusion

The analysis presented in demonstrates that faith is neither a semantically uniform concept nor a lexical category that can be transferred mechanically from one language to another. It combines at least four interrelated dimensions: propositional assent, personal trust, religious adherence, and existential entrustment. Tagalog/Filipino, English, and Polish express these dimensions through partially overlapping lexical and grammatical systems.

The principal terms Tagalog/Filipino *pananampalataya*, English *faith*, and Polish *wiara*—share a central religious meaning and can function as primary translation equivalents. Their equivalence, however, remains partial rather than complete. Each term occupies a different position within its respective semantic field. Tagalog/Filipino distinguishes *pananampalataya* from *paniniwala*, *tiwala*, and *pagtitiwala*. English differentiates *faith*,

belief, trust, and entrustment. Polish organises the same conceptual domain through *wiara, przekonanie, wierzenie, zaufanie, ufność, and zawierzenie*.

The comparison reveals three principal dimensions of faith:

Dimension	Tagalog/Filipino	English	Polish
religious and doctrinal	<i>pananampalataya</i>	<i>faith</i>	<i>wiara</i>
cognitive and propositional	<i>paniniwala</i>	<i>belief</i>	<i>przekonanie, wierzenie</i>
relational and fiducial	<i>tiwala, pagtitiwala</i>	<i>trust, reliance</i>	<i>zaufanie, ufność, zawierzenie</i>

These correspondences cannot be applied automatically. Their adequacy depends on the sentence structure, textual genre, collocation, communicative purpose, and theological function of the expression. The meaning of faith is consequently produced not only by the selected noun but also by verbs, complements, prepositions, aspectual distinctions, and relations between participants.

The Polish constructions *wierzyć w Boga, wierzyć Bogu, ufać Bogu, and zawierzyć Bogu* demonstrate the importance of grammar for theological meaning. The first construction can express religious faith in God; the second foregrounds the recognition of God's truthfulness; the third explicitly communicates personal trust; and the fourth profiles an intentional act of entrustment. A translation that reduces these constructions to one undifferentiated equivalent can obscure distinctions encoded by Polish grammar.

A corresponding differentiation is visible in Tagalog/Filipino between verbal forms related to *sampalataya, paniwala, and tiwala*. These roots do not merely provide stylistic variants. They can distinguish religious belief, acceptance of a proposition, belief in another person, and relational trust. Morphological derivation additionally profiles faith as a state, action, process, or disposition. The translation of the concept therefore requires an analysis of complete grammatical constructions rather than isolated dictionary entries.

From a theological perspective, faith cannot be reduced either to the intellectual acceptance of religious propositions or to subjective confidence. Catholic theology integrates assent to revealed truth with personal adherence to the revealing God. The believer accepts what God reveals because God is recognised as truthful and trustworthy. Faith consequently includes both a propositional object—the content of revelation—and a personal object—God.

This theological integration creates a particular challenge for translation. Rendering faith exclusively through a term corresponding to *belief* can weaken its relational and existential dimensions. Rendering it exclusively through *trust* can obscure its cognitive, doctrinal, and ecclesial content. An adequate interpretation preserves the relationship between belief, trust, confession, and commitment.

The study also demonstrates that migration constitutes more than the external social background of linguistic comparison. Migration creates the communicative conditions in which Filipino, English, and Polish religious terminology enters into direct or indirect contact. Filipino migrants in Poland can encounter Polish religious language in liturgy, catechesis, parish communication, sacramental preparation, devotional practice, and interpersonal interaction. At the same time, Filipino, English, Taglish, or Philippine regional languages can remain part of their religious repertoires.

The resulting communicative configuration is not simply bilingual. It can involve several translation trajectories. English occupies a particularly significant position in this model. It can facilitate communication between Filipino migrants and Polish religious institutions, functioning as a linguistic bridge. At the same time, it can become a semantic filter. A Filipino expression is first interpreted through an English category and subsequently transferred into Polish. Each stage can preserve, broaden, narrow, explicate, or neutralise a component of the original meaning.

The second sequence remains theologically acceptable, but the action of trusting is less directly lexicalised. This example shows that relay translation does not necessarily produce an error. It can, however, modify the semantic profile of the concept.

The acquisition of Polish religious vocabulary can lead to a restructuring of previously established semantic relations. An initial learner may associate Polish *wiara* with English *faith* and Filipino *pananampalataya*. More advanced competence introduces additional distinctions between *wiara*, *przekonanie*, *zaufanie*, *ufność*, and *zawierzenie*. This process expands the multilingual speaker's conceptual and lexical repertoire.

Consequently, contact between languages does not have to result solely in semantic loss. It can contribute to conceptual enrichment.

Multilingual comparison can therefore illuminate the internal complexity of the theological concept. The differences between the languages do not necessarily represent contradictions. They can function as complementary semantic perspectives on the same religious reality.

The analysis further indicates that religious language performs cognitive, affective, ritual, and identity-forming functions. A prayer learned in Filipino or another Philippine language can retain emotional and autobiographical associations that are not automatically reproduced in Polish. Conversely, learning Polish liturgical and theological terminology can facilitate participation in the local Church. These functions can coexist within one multilingual repertoire.

Three general models of religious language use can be distinguished in the migration context. Linguistic assimilation gives Polish an exclusive position and may limit the expression of inherited religious forms. Linguistic separation preserves Filipino or English communication but can reduce interaction with the local parish. Intercultural integration assigns complementary functions to Polish, English, Filipino, and other Philippine languages. The third model offers the greatest potential for combining participation in the Polish Church with continuity of Filipino religious identity.

The available evidence confirms the existence of Filipino migration and organised pastoral ministry in Poland. It does not provide sufficient data to determine how individual migrants understand *pananampalataya*, *faith*, or *wiara*. The present conclusions must therefore remain within the boundaries of linguistic and textual analysis.

The study establishes that:

1. the three languages organise the semantic field of faith differently;
2. the central terms are partially, not completely, equivalent;
3. English mediation can influence Filipino–Polish translation;
4. Polish grammatical constructions introduce relevant theological distinctions;
5. migration creates a real environment for multilingual religious communication;

6. semantic differences can lead to reduction, reinterpretation, or enrichment;
7. actual migrant practices require separate empirical investigation.

The research does not establish that Filipino migrants misunderstand Polish religious terminology or that migration transforms their faith. Such claims require interviews, questionnaires, observation, translation tasks, or analysis of authentic migrant discourse. The study identifies the linguistic mechanisms through which such processes could occur and provides categories for their future investigation.

The principal conclusion is that the translation of faith among Filipino migrants in Poland needs to be understood as multilingual conceptual mediation. It involves movement not only between words but also between semantic fields, grammatical systems, theological traditions, and culturally embedded forms of religious expression. *Pananampalataya*, *faith*, and *wiara* refer to a substantially shared religious concept, yet each language profiles that concept differently.

Translation does not eliminate these differences. It selects, reorganises, and interprets them. Recognising this process enables a more precise description of faith and creates a reliable theoretical foundation for future research into the religious language of Filipino migrants in Poland.

Bibliography:

Filipino Migrants in Poland

1. Alcover, T. (2025). The mission of Rogationists in Poland among Filipino migrants. *Warszawskie Studia Pastoralne*, 59(1), 159–179. <https://doi.org/10.21697/wsp.2025.1.06>
2. Wanicka, O. (2024). Infrastruktura migracyjna w Polsce i jej wielowymiarowość na przykładzie filipińskiego vloga YouTube [Migration infrastructure in Poland and its multidimensionality: The case of a Filipino YouTube vlog]. *Studia Migracyjne – Przegląd Polonijny*, 50(1), 59–81.
3. Wanicka, O., & Patzer, H. (2024). Przepustka do lepszego życia? Praca w Polsce w wyobrażeniach filipińskich migrantów [A ticket to a better life? Work in Poland in the imaginaries of Filipino migrants]. *Etnografia Polska*, 68, 23–43. <https://doi.org/10.23858/EP68.2024.3839>.

Theology of Faith and Primary Sources

4. Catholic Bishops' Conference of the Philippines. (1997). *Catechism for Filipino Catholics*. Episcopal Commission on Catechesis and Catholic Education.
5. Catholic Church. (1997). *Catechism of the Catholic Church* (2nd ed.). Libreria Editrice Vaticana.
6. Dicastery for Promoting Integral Human Development. (2022). *Pastoral orientations on intercultural migrant ministry*. Libreria Editrice Vaticana. Official text.
7. Francis. (2013). *Lumen fidei*. Libreria Editrice Vaticana. Official text.
8. Philippine Bible Society. (2012). *Magandang Balita Biblia*. Philippine Bible Society.
9. Pontifical Council for the Pastoral Care of Migrants and Itinerant People. (2004). *Erga migrantes caritas Christi*. Libreria Editrice Vaticana. Official text.

10. Second Vatican Council. (1965). *Dei verbum: Dogmatic constitution on divine revelation*. Libreria Editrice Vaticana. Official text.

Religion, Language, and Identity in the Filipino Diaspora

11. Jang, H. C. (2017). Practicing Filipino Catholicism in Korea: Characteristics of Hyehwa-dong Filipino Catholic Community (HFCC) in Seoul. *Korea Journal*, 57(4), 72–97. <https://doi.org/10.25024/kj.2017.57.4.72>
12. Levitt, P. (2007). *God needs no passport: Immigrants and the changing American religious landscape*. The New Press.
13. Nititham, D. S. (2016). *Making home in diasporic communities: Transnational belonging amongst Filipina migrants*. Routledge.
14. Tondo, J. S. F. (2010). Popular religiosity and the transnational journey: Inscribing Filipino identity in the Santo Niño fiesta in New Zealand. *The Asia Pacific Journal of Anthropology*, 11(3–4), 219–244. <https://doi.org/10.1080/14442213.2010.513401>
15. Tondo, J. S. F. (2014). Sacred enchantment, transnational lives, and diasporic identity: Filipina domestic workers at St. John Catholic Cathedral in Kuala Lumpur. *Philippine Studies: Historical and Ethnographic Viewpoints*, 62(3–4). <https://doi.org/10.13185/2244-1638.4049>
16. Umel, A. (2023). Filipino migrants in Germany and their diasporic (irony) chronotopes in Facebook. *International Journal of Cultural Studies*, 26(6). <https://doi.org/10.1177/13678779221126538>
17. Vásquez, M. A., & Marquardt, M. F. (2003). *Globalizing the sacred: Religion across the Americas*. Rutgers University Press.
18. Vertovec, S. (2009). *Transnationalism*. Routledge.

Migration, Multilingual Repertoires, and Identity

19. Blackledge, A., & Creese, A. (2010). *Multilingualism: A critical perspective*. Continuum.
20. Blommaert, J. (2010). *The sociolinguistics of globalization*. Cambridge University Press.
21. Busch, B. (2012). The linguistic repertoire revisited. *Applied Linguistics*, 33(5), 503–523. <https://doi.org/10.1093/applin/ams056>
22. Canagarajah, S. (Ed.). (2017). *The Routledge handbook of migration and language*. Routledge. <https://doi.org/10.4324/9781315754512>
23. Capstick, T. (2020). *Language and migration*. Routledge. <https://doi.org/10.4324/9781351207713>
24. García, O., & Li Wei. (2014). *Translanguaging: Language, bilingualism and education*. Palgrave Macmillan.
25. Gardner-Chloros, P. (2009). *Code-switching*. Cambridge University Press.
26. Li Wei. (2018). Translanguaging as a practical theory of language. *Applied Linguistics*, 39(1), 9–30. <https://doi.org/10.1093/applin/amx039>
27. Pennycook, A. (2010). *Language as a local practice*. Routledge.
28. Vertovec, S. (2007). Super-diversity and its implications. *Ethnic and Racial Studies*, 30(6), 1024–1054. <https://doi.org/10.1080/01419870701599465>

Filipino, Tagalog, Philippine English, and Taglish

29. Adelaar, K. A., & Himmelmann, N. P. (Eds.). (2005). *The Austronesian languages of Asia and Madagascar*. Routledge.
30. Bautista, M. L. S. (2004). Tagalog-English code-switching as a mode of discourse. *Asia Pacific Education Review*, 5(2), 226–233. <https://doi.org/10.1007/BF03024960>
31. Bautista, M. L. S., & Bolton, K. (Eds.). (2008). *Philippine English: Linguistic and literary perspectives*. Hong Kong University Press.
32. English, L. J. (1986). *Tagalog-English dictionary*. Congregation of the Most Holy Redeemer.
33. Gonzalez, A. B. (1998). The language planning situation in the Philippines. *Journal of Multilingual and Multicultural Development*, 19(5–6), 487–525. <https://doi.org/10.1080/01434639808666365>
34. Komisyon sa Wikang Filipino. (n.d.). *KWF Diksiyonaryo ng Wikang Filipino*. Retrieved August 21, 2026, from <https://kwfdiksiyonaryo.ph/>
35. Schachter, P., & Otanes, F. T. (1972). *Tagalog reference grammar*. University of California Press.
36. Thompson, R. M. (2003). *Filipino English and Taglish: Language switching from multiple perspectives*. John Benjamins. <https://doi.org/10.1075/veaw.g31>

Lexical Semantics and Conceptual Analysis

37. Cruse, D. A. (1986). *Lexical semantics*. Cambridge University Press.
38. Geeraerts, D. (2010). *Theories of lexical semantics*. Oxford University Press.
39. Goddard, C., & Wierzbicka, A. (2014). *Words and meanings: Lexical semantics across domains, languages, and cultures*. Oxford University Press.
40. Lehrer, A. (1974). *Semantic fields and lexical structure*. North-Holland.
41. Wierzbicka, A. (1992). *Semantics, culture, and cognition: Universal human concepts in culture-specific configurations*. Oxford University Press.
42. Wierzbicka, A. (1996). *Semantics: Primes and universals*. Oxford University Press.
43. Wierzbicka, A. (1997). *Understanding cultures through their key words: English, Russian, Polish, German, and Japanese*. Oxford University Press.

Translation Theory and Bible Translation

44. Baker, M. (2018). *In other words: A coursebook on translation* (3rd ed.). Routledge.
45. de Waard, J., & Nida, E. A. (1986). *From one language to another: Functional equivalence in Bible translating*. Thomas Nelson.
46. Munday, J., Ramos Pinto, S., & Blakesley, J. (2022). *Introducing translation studies: Theories and applications* (5th ed.). Routledge.
47. Newmark, P. (1988). *A textbook of translation*. Prentice Hall.
48. Nida, E. A. (1964). *Toward a science of translating: With special reference to principles and procedures involved in Bible translating*. E. J. Brill.
49. Nida, E. A., & Taber, C. R. (1969). *The theory and practice of translation*. E. J. Brill.
50. Nord, C. (2018). *Translating as a purposeful activity: Functionalist approaches explained* (2nd ed.). Routledge.

51. Venuti, L. (2018). *The translator's invisibility: A history of translation* (3rd ed.). Routledge.

17. BETWEEN FIDELITY AND ADAPTATION: A COMPARATIVE ANALYSIS OF THE OFFICIAL TRANSLATIONS OF POPE LEO XIV'S CORPUS CHRISTI HOMILY IN MADRID

Stanisław Schabowicz

PhD Student in Theology

Faculty of Theology Cardinal Stefan Wyszyński University in Warsaw, Poland

PhD Student in Spanish: Linguistics, Literature and Communication Department of Spanish Language, University of Valladolid, Spain

<https://orcid.org/my-orcid?orcid=0000-0002-1140-230X>

1. Introduction

The translation of theological discourse presents a particular challenge because it involves more than the transfer of lexical meaning between languages. Theological texts are embedded in specific doctrinal, liturgical, cultural, and rhetorical traditions, while their translations are received within linguistic communities that may conceptualize and express the same religious realities in different ways. This tension becomes particularly evident in the translation of papal homilies, which combine doctrinal content with biblical interpretation, liturgical terminology, pastoral exhortation, rhetorical structures, metaphorical language, and culturally embedded references. Translation therefore requires decisions concerning not only what a given expression means, but also which features of the source text should be preserved, and which may require modification to function within the target language and culture.

The relationship between fidelity and adaptation is particularly significant in theological translation. Fidelity cannot be reduced to formal or lexical similarity, since a formally close rendering may fail to reproduce the semantic, theological, rhetorical, or pragmatic function of a source-text feature. As Pope Francis emphasizes in *Magnum principium* fidelity “*cannot always be judged by individual words*” but must be considered within the context of the communicative act and the literary genre of the text. Conversely, adaptation should not automatically be understood as a departure from fidelity. As magisterial reflection on liturgical translation itself acknowledges, fidelity to the meaning of the source text may in certain cases require lexical, syntactic, or stylistic modification in the target language. This principle corresponds to Paul VI's broader distinction between the preservation of the essential truth of the Christian message and its transposition into the language, signs, and cultural categories comprehensible to its recipients. From a translation-studies perspective, such transformations may occur at different syntactic, semantic, and pragmatic levels. Consequently, fidelity and adaptation should be examined not as absolute evaluations of an entire translation, but in relation to source-text features, the levels at which their preservation or modification occurs, and the translational effects produced by these choices.

The present study examines these issues through a comparative analysis of the official translations of Pope Leo XIV's homily delivered during the celebration of the Solemnity of the Most Holy Body and Blood of Christ in Madrid on 7 June 2026. The Spanish version is treated

as the source text and compared with the official Italian, French, Portuguese, English and Polish versions published by the Holy See. The homily provides a particularly valuable corpus because it combines universal Catholic teaching on the Eucharist with elements deeply rooted in Spanish religious culture, including Corpus Christi processions, floral decorations, street altars, Eucharistic objects, historical memory, and references to Spanish saints and spirituality. At the same time, the text displays a distinctive linguistic and rhetorical profile, including theological terminology, grammatical modality, parallel structures, antitheses, and extended metaphorical networks, particularly those associated with water, thirst, nourishment, and movement.

The five comparative languages represent two structurally different groups. Italian, Portuguese and French are Romance languages and consequently display a relatively high degree of lexical, morphological and syntactic proximity to Spanish. Polish and English belong to different language families and require more extensive grammatical restructuring. Polish is a highly inflected Slavic language, whereas English depends more heavily on fixed word order, analytic constructions and overt syntactic subjects. These systemic differences provide an opportunity to distinguish close formal correspondence from functional equivalence and language-conditioned adaptation.

Accordingly, fidelity and adaptation are interpreted as interdependent analytical categories. Fidelity describes the preservation of significant features of the Spanish text, whereas adaptation denotes an observable reorganization of its linguistic expression. The decisive criterion is not the mere presence of formal difference but the semantic, pragmatic and rhetorical effect produced by that difference.

The principal aim of this study is to determine how the official Italian, Portuguese, French, Polish and English versions reproduce the theological meaning, liturgical terminology, metaphorical organization, rhetorical structure and pastoral function of the Spanish text of Pope Leo XIV's Corpus Christi homily.

The research does not aim to rank the five translations globally from “*best*” to “*worst*.” Its purpose is to identify specific linguistic operations and determine their local effects. A version can display close fidelity in one passage and significant adaptation in another. The analytical unit is therefore the individual textual segment rather than the translation as an undifferentiated whole. The study addresses the following principal research question:

How do the official Italian, Portuguese, French, Polish and English versions of Pope Leo XIV's Corpus Christi homily reproduce the theological meaning, liturgical terminology, metaphorical organization and rhetorical-pragmatic function of the Spanish reference text through strategies of fidelity and adaptation?

The study is based exclusively on the six versions published on the official website of the Holy See. The Spanish text serves as the reference version, while the Italian, Portuguese, French, Polish and English texts constitute the comparative corpus.

The study employs a qualitative, contrastive and text-based method. It combines comparative linguistics, translation-shift analysis, lexical semantics, text linguistics, pragmatics and rhetorical analysis.

Firstly, every passage is verified in the six official Vatican versions. Secondly, semantically corresponding segments are aligned. Thirdly, differences are described at the

relevant linguistic levels. Fourthly, the identified relationship is classified as fidelity, adaptation or a combination of the two. Fifthly, its semantic, pragmatic, rhetorical and theological effects are evaluated. The detailed analysis is organized around two groups: cases of fidelity; cases of adaptation.

The selection is qualitative. It does not establish the statistical frequency of translation procedures in the complete texts. Consequently, the conclusions describe tendencies observable in the selected cases rather than numerical properties of the entire corpus.

2. Fidelity in the Official Translations

Fidelity is understood in this study as the preservation of the significant linguistic and communicative features of the Spanish reference text. It includes not only lexical correspondence but also the maintenance of propositional content, theological terminology, grammatical agency, metaphorical organization, rhetorical structure and pragmatic function.

Since the five comparative languages possess different grammatical and lexical systems, fidelity does not require formal identity. Italian, Portuguese and French often reproduce Spanish structures through cognate vocabulary and parallel syntax. Polish and English require more extensive restructuring, but this does not necessarily modify the semantic or theological content. A passage can therefore display functional and semantic fidelity despite differences in word order, clause structure or lexical realization.

The following five cases demonstrate how the official versions preserve the principal theological and rhetorical structures of the Spanish homily:

1. the Eucharist as Christ's living presence and the living Bread;
2. the risen Lord as bread for humanity's hunger for life;
3. the procession as Christ's movement towards human life;

Case 1: The Eucharist as Christ's Living Presence and the Living Bread

Language	Official wording
Spanish	<i>"Estamos reunidos en torno a la Eucaristía, el don de la presencia viva de Cristo en medio de nosotros. Él, que quiso ofrecernos su vida para hacernos entrar en la comunión del Padre y convertirnos en hijos suyos, está aquí,</i>

	<i>como Pan vivo bajado del cielo, que nos alimenta con la misma vida de Dios, con un amor más fuerte que la muerte."</i>
Italian	<i>"Siamo radunati attorno all'Eucaristia, il dono della presenza viva di Cristo in mezzo a noi. Egli, che ha voluto offrirci la sua vita per farci entrare nella comunione del Padre e renderci suoi figli è qui, come pane vivo disceso dal cielo, che ci sfama con la stessa vita di Dio, con un amore più forte della morte".</i>
Portuguese	<i>"Estamos reunidos em torno à Eucaristia, o dom da presença viva de Cristo no meio de nós. Ele, que quis oferecer-nos a sua vida para nos fazer entrar na comunhão do Pai e tornar-nos seus filhos, está aqui, como Pão vivo descido do céu, que nos alimenta com a própria vida de Deus, com um amor mais forte que a morte."</i>
French	<i>"Nous sommes réunis autour de l'Eucharistie, don de la présence vivante du Christ parmi nous. C'est lui qui a voulu nous offrir sa vie pour nous faire entrer dans la communion du Père et faire de nous ses enfants. Il est ici, comme le Pain vivant descendu du ciel, qui nous nourrit de la vie même de Dieu, d'un amour plus fort que la mort."</i>
Polish	<i>"Jesteśmy zgromadzeni wokół Eucharystii, daru żywej obecności Chrystusa pośród nas. On, który zechciał oddać za nas swoje życie, aby wprowadzić nas do komunii z Ojcem i uczynić swoimi dziećmi, jest tutaj jako Chleb żywy, który zstąpił z nieba i karmi nas samym życiem Boga, miłością mocniejszą od śmierci."</i>
English	<i>"We are gathered around the Eucharist, the gift of Christ's living presence among us. He who wished to offer us his life so that we might enter into communion with the Father and become his children, is here as the living Bread come down from heaven, to nourish us with the very life of God, with a love stronger than death."</i>

The initial first-person plural construction is maintained in all five versions:

Spanish	Italian	Portuguese	French	Polish	English
<i>Estamos reunidos</i>	<i>Siamo radunati</i>	<i>Estamos reunidos</i>	<i>Nous sommes réunis</i>	<i>Jesteśmy zgromadzeni</i>	<i>We are gathered</i>

Every version employs a passive or resultative structure describing the community as already assembled. The participants are not presented as autonomous individuals who happen to occupy the same physical location. They form a collective subject gathered around the Eucharist. The prepositional expressions also remain semantically stable:

- *en torno a la Eucaristía;*
- *attorno all'Eucaristia;*
- *em torno à Eucaristia;*
- *autour de l'Eucharistie;*
- *wokół Eucharystii;*
- *around the Eucharist.*

All six constructions spatially and symbolically position the Eucharist at the centre of the assembly. The spatial image therefore communicates an ecclesiological relationship: the community is constituted around Christ's Eucharistic presence.

Preservation of the appositional definition

The Spanish noun phrase *el don de la presencia viva de Cristo* defines the Eucharist through an appositional construction. This relationship is reproduced in every version: Italian: *il dono della presenza viva di Cristo*; Portuguese: *o dom da presença viva de Cristo*; French: *don de la présence vivante du Christ*; Polish: *daru żywej obecności Chrystusa*; English: *the gift of Christ's living presence*.

The English version changes the order of the genitival relations, placing the possessor first in *Christ's living presence*. This is a normal English structural preference and does not alter the semantic hierarchy. Christ remains the one whose living presence constitutes the Eucharistic gift.

The adjective *viva* is transferred as *viva*, *viva*, *vivante*, *żywej* and *living*. None of the versions reduces the expression to an unspecified "presence." The dynamic quality encoded by "living" remains explicit.

Preservation of the "living Bread" designation

The Christological expression *Pan vivo bajado del cielo* is maintained through direct or functionally equivalent constructions:

Language	Equivalent
Spanish	<i>Pan vivo bajado del cielo</i>
Italian	<i>pane vivo disceso dal cielo</i>
Portuguese	<i>Pão vivo descido do céu</i>
French	<i>Pain vivant descendu du ciel</i>
Polish	<i>Chleb żywy, który zstąpił z nieba</i>
English	<i>living Bread come down from heaven</i>

Italian, Portuguese and French preserve the participial structure. English uses the reduced relative form *come down from heaven*. Polish expands the participle into the finite relative clause *który zstąpił z nieba*. This represents morphosyntactic restructuring, but the four semantic components remain unchanged: Christ is identified as Bread; the Bread is living; its movement is downward; heaven is its point of origin.

Polish therefore demonstrates semantic fidelity through syntactic adaptation.

Divine life as Eucharistic nourishment

The verbal structures retain the relationship between Christ, the community and divine life:

- *nos alimenta con la misma vida de Dios*;
- *ci sfama con la stessa vita di Dio*;
- *nos alimenta com a própria vida de Deus*;
- *nous nourrit de la vie même de Dieu*;
- *karmi nas samym życiem Boga*;
- *nourish us with the very life of God*.

The first-person plural object remains present in every version. The community is consistently represented as the recipient of nourishment. Spanish *la misma vida de Dios* is reproduced through expressions emphasizing identity or intrinsic possession: Italian *la stessa*

vita di Dio; Portuguese *a própria vida de Deus*; French *la vie même de Dieu*; Polish *samym życiem Boga*; English *the very life of God*.

Portuguese uses *própria*, while French, Polish and English employ intensifying equivalents corresponding to “*the very life of God*.” These differences modify the form of emphasis but preserve the theological proposition that Eucharistic nourishment consists not merely in a gift from God but in participation in God’s own life.

Case 2: The Risen Lord as Bread for Humanity’s Hunger for Life

Language	Official wording
Spanish	“ <i>No se trata de una manifestación exterior, de una supervivencia folclórica o de un simple adorno estético: aquí se trata de la fe en la presencia del Señor Resucitado, que está vivo y sigue pasando en medio de nosotros, que se hace pan para nuestra hambre de vida y visita los rincones de nuestro corazón y de nuestra historia, también los más oscuros.</i> ”
Italian	“ <i>Non si tratta di una manifestazione esteriore, di una sopravvivenza folkloristica o di un semplice ornamento estetico: qui si tratta della fede nella presenza del Signore Risorto, che è vivo e passa ancora in mezzo a noi, che si fa pane per la nostra fame di vita e visita gli angoli del nostro cuore e della nostra storia, anche quelli più oscuri.</i> ”
Portuguese	“ <i>Não se trata de uma manifestação exterior, de uma sobrevivência folclórica ou de um simples adorno estético: trata-se aqui da fé na presença do Senhor Ressuscitado, que está vivo e continua a passar no meio de nós, que se faz pão para a nossa fome de vida e visita os recantos do nosso coração e da nossa história, também os mais escuros.</i> ”
French	“ <i>Il ne s’agit pas d’une manifestation extérieure, d’une survivance folklorique ou d’une simple parure esthétique : il s’agit ici de la foi en la présence du Seigneur ressuscité, qui est vivant et continue de passer au milieu de nous, qui se fait pain pour notre faim de vie et visite les recoins de notre cœur et de notre histoire, même les plus sombres.</i> ”
Polish	“ <i>Nie chodzi tu o zewnętrzną manifestację, folklorystyczny relikw czy zwykłą ozdobę estetyczną. Chodzi tu o wiarę w obecność Pana Zmartwychwstałego, który żyje i nadal przechodzi pośród nas, który staje się chlebem dla naszego głodu życia i nawiedza zakamarki naszego serca oraz naszej historii, także te najciemniejsze.</i> ”

English	<i>“This is not an exhibition, a remnant of folklore or a simple display of beauty. It is a profession of faith in the presence of the risen Lord, who is alive and continues to walk among us, who becomes bread to satiate our hunger for life, and visits the recesses of our hearts and history, even those shrouded in darkness.”</i>
---------	--

Preservation of Christological identity

All five versions preserve both elements of the Spanish expression: the title “Lord” and the reference to the Resurrection. No translation reduces the phrase to a personal name or a general reference to Christ.

Living presence and continued movement

The Spanish text coordinates two present-tense actions:

- *está vivo*;
- *sigue pasando*.

The corresponding versions maintain the same semantic relationship:

Language	Life	Continued movement
Italian	<i>è vivo</i>	<i>passa ancora</i>
Portuguese	<i>está vivo</i>	<i>continua a passar</i>
French	<i>est vivant</i>	<i>continue de passer</i>
Polish	<i>żyje</i>	<i>nadal przechodzi</i>
English	<i>is alive</i>	<i>continues to walk</i>

The continuative meaning of Spanish *sigue* is reproduced through *ancora*, *continua*, *nadal* and *continues*. Christ’s movement is consequently represented as ongoing in every language.

English *walk* is more specific than Spanish *pasar*, but it remains compatible with the procession imagery developed throughout the homily. The central proposition that the risen Christ continues to move among the peoples preserved.

Case 3: The Procession as Christ’s Movement towards Human Life

Language	Key sequence
Spanish	<i>“Así, si en la Celebración eucarística Cristo se entrega como alimento, la procesión dice que Él no permanece encerrado en el templo, sino que sale a nuestro encuentro. Jesús camina por las calles, atraviesa las plazas, visita nuestros barrios, habita los lugares de nuestra vida cotidiana. Él es el Dios cercano que camina con su pueblo, el Señor de la historia, consuelo de los débiles, luz para las familias, esperanza para los enfermos, paz para quien sufre.”</i>
Italian	<i>“Così, se nella Celebrazione eucaristica Cristo si dona come alimento, la processione dice che Egli non rimane chiuso nel tempio ma, anzi, esce incontro a noi. Gesù cammina per le strade, attraversa le piazze, visita i nostri quartieri, abita i luoghi della nostra vita quotidiana, come il Dio vicino che cammina con il suo popolo, come il Signore della storia, consolazione dei deboli, luce per le famiglia, speranza per i più fragili, pace per chi soffre”</i>

Portuguese	<i>“Assim, se na celebração eucarística Cristo se entrega como alimento, a procissão diz que Ele não permanece fechado no templo, mas sai ao nosso encontro. Jesus caminha pelas ruas, atravessa as praças, visita os nossos bairros, habita os lugares da nossa vida quotidiana. Ele é o Deus próximo que caminha com o seu povo, o Senhor da história, consolo dos fracos, luz para as famílias, esperança para os doentes, paz para quem sofre.”</i>
French	<i>“Ainsi, si le Christ se donne en nourriture lors de la célébration eucharistique, la procession dit qu’Il ne reste pas enfermé dans le temple, mais qu’Il sort à notre rencontre. Jésus marche dans les rues, traverse les places, visite nos quartiers, habite les lieux de notre vie quotidienne. Il est le Dieu proche qui marche avec son peuple, le Seigneur de l’histoire, la consolation des faibles, la lumière pour les familles, l’espérance pour les malades, la paix pour ceux qui souffrent.”</i>
Polish	<i>“Jeżeli więc podczas celebracji eucharystycznej Chrystus daje siebie jako pokarm, procesja ukazuje, że nie pozostaje On zamknięty w świątyni, lecz wychodzi nam na spotkanie. Jezus przemierza ulice, przechodzi przez place, odwiedza nasze dzielnice, zamieszkuje miejsca naszego codziennego życia. Jest On Bogiem bliskim, który idzie ze swoim ludem; Panem dziejów, pociechą dla słabych, światłem dla rodzin, nadzieją dla chorych, pokojem dla cierpiących.”</i>
English	<i>“Just as Christ gives himself as food in the Eucharistic celebration, the procession shows that he is not confined to the church, but comes out to meet us. Jesus travels the streets, crosses the squares and visits our neighborhoods, dwelling in the settings of our daily lives. He is a God who is close to us, who walks with his people, the Lord of history. He is comfort to the weak, light for families, hope for the sick and peace for those who suffer. “</i>

Grammatical agency

Christ remains the subject of both verbal predicates: he does not remain enclosed; he goes out to meet the people.

No version replaces this personal agency with an impersonal statement about the procession. The Eucharistic procession is interpreted through Christ’s action rather than exclusively through the human action of carrying the monstrance.

The goal-oriented phrase is also maintained:

- *a nuestro encuentro;*
- *incontro a noi;*
- *ao nosso encontro;*
- *à notre rencontre;*
- *nam na spotkanie;*
- *to meet us.*

The first-person plural forms preserve the relational orientation: Christ moves towards “us.”

Preservation of the four-part movement sequence

Spanish contains four coordinated present-tense verbs: *camina*; *atraviesa*; *visita*; *habita*.

The same progression is visible across the versions:

Function	Spanish	Italian	Portuguese	French	Polish	English
movement along streets	<i>camina</i>	<i>cammina</i>	<i>caminha</i>	<i>marche</i>	<i>przemierza</i>	<i>travels</i>
crossing squares	<i>atraviesa</i>	<i>attraversa</i>	<i>atravessa</i>	<i>traverse</i>	<i>przechodzi przez</i>	<i>crosses</i>
visiting neighbourhoods	<i>visita</i>	<i>visita</i>	<i>visita</i>	<i>visite</i>	<i>odwiedza</i>	<i>visits</i>
dwelling in daily life	<i>habita</i>	<i>abita</i>	<i>habita</i>	<i>habite</i>	<i>zamieszkuje</i>	<i>dwelling</i>

English changes the fourth finite verb into the participle *dwelling*. The alteration reduces the strict formal parallelism but retains the semantic culmination of the sequence. The sequence moves from public space towards the ordinary environments inhabited by the recipients. All versions preserve this transition.

The four verbs do not function as simple synonyms. They create a gradual intensification: walking describes movement; crossing indicates passage through public space; visiting establishes interpersonal proximity; inhabiting expresses stable presence.

The final verbs *abita*, *habita*, *habite*, *zamieszkuje* and *dwelling* preserve the contrast between transitory procession and enduring presence. Christ does not merely pass through public space; he inhabits human daily life.

3. Adaptation in the Official Translations

Adaptation refers to an observable modification of the linguistic form, semantic perspective, degree of explicitness, cultural reference or rhetorical organization of the Spanish text. It does not automatically indicate mistranslation or loss of fidelity. In many cases, adaptation enables the comparative version to reproduce a concept through terminology and structures established in the target language.

The analysis distinguishes three principal types of adaptation:

4. **systemically motivated adaptation**, resulting from grammatical differences between languages;
5. **conventionally motivated adaptation**, resulting from liturgical, cultural or terminological conventions;
6. **optional semantic adaptation**, in which a version selects one interpretation from several possible meanings or modifies the conceptual perspective.

The five cases examined below concern:

1. the polysemy of Spanish *memoria*;
2. the terminology of Eucharistic objects;
3. the adaptation of the concluding water metaphor.

The Polysemy of *Memoria*

The Spanish noun *memoria* occurs in two distinct contexts: *Esta memoria del Señor presente en el Pan eucarístico y la memoria histórica de las procesiones del Corpus Christi*.

The first occurrence refers to the Eucharistic remembrance or memorial of the present Lord. The second refers to the historical memory of the processions. The translations reveal different strategies of lexical differentiation.

First occurrence: Eucharistic *memoria*

Language	Equivalent
Spanish	<i>Esta memoria del Señor presente en el Pan eucarístico</i>
Italian	<i>Questa memoria del Signore presente nel Pane eucaristico</i>
Portuguese	<i>Esta memória do Senhor presente no Pão eucarístico</i>
French	<i>Ce mémorial du Seigneur présent dans le Pain eucharistique</i>
Polish	<i>Ta pamiątka Pana obecnego w Chlebie eucharystycznym</i>
English	<i>This awareness of the Lord's presence in the Eucharistic Bread</i>

Italian *memoria* and Portuguese *memória* preserve the Spanish noun through direct cognate equivalents. Both retain the grammatical structure in which the Lord is present in the Eucharistic Bread. This strategy maintains lexical proximity, but the corresponding nouns can cover several meanings, including memory, remembrance and memorial. The theological interpretation remains dependent on context. French employs: *Ce mémorial du Seigneur* The noun *mémorial* is more specialized than the general French noun *mémoire*. It designates an act or reality that commemorates and makes present a foundational event. The French version narrows the possible interpretations and emphasizes the liturgical dimension. The Eucharist is not presented merely as a mental recollection of Christ but as a memorial centred on the Lord's presence.

Polish uses: *Ta pamiątka Pana* The noun *pamiątka* can denote a memorial, remembrance or commemorative sign. It preserves the commemorative dimension but does not possess exactly the same lexical range as Spanish *memoria*. In the phrase *pamiątka Pana obecnego*, the noun combines remembrance with present reality. The Lord is not represented only as someone remembered from the past; he is explicitly described as present in the Eucharistic Bread.

The Polish choice is therefore a lexical modulation from the faculty or act of memory towards a commemorative reality.

English departs most clearly from the lexical field of memory: *This awareness of the Lord's presence* The noun *awareness* denotes conscious recognition or perception. It does not directly mean memory or memorial. The English version therefore changes the temporal and cognitive profile of the sentence:

Spanish <i>memoria</i>	English <i>awareness</i>
connects present faith with remembrance	foregrounds present consciousness
contains a retrospective dimension	emphasizes recognition in the present
can carry liturgical-memorial meaning	uses a general cognitive category

The phrase also reorganizes the complement. Spanish refers to *the Lord present in the Eucharistic Bread*, whereas English speaks of *the Lord's presence in the Eucharistic Bread*. This involves both nominalization and semantic modulation. The English rendering preserves the doctrine of Christ's Eucharistic presence but attenuates the lexical connection with memorial remembrance.

Second occurrence: historical memory

Language	Equivalent
Spanish	<i>la memoria histórica</i>
Italian	<i>la memoria storica</i>
Portuguese	<i>a memória histórica</i>
French	<i>la mémoire historique</i>
Polish	<i>historyczna pamięć</i>
English	<i>the historical memory</i>

In the second context, all five versions use direct equivalents of “historical memory.” French changes from *mémorial* to *mémoire*, Polish from *pamiątka* to *pamięć*, and English from *awareness* to *memory*.

These changes demonstrate that the translators do not treat the two occurrences of Spanish *memoria* as semantically identical:

Language	Eucharistic context	Historical context
French	<i>mémorial</i>	<i>mémoire</i>
Polish	<i>pamiątka</i>	<i>pamięć</i>
English	<i>awareness</i>	<i>memory</i>

The lexical differentiation reflects contextual disambiguation.

Case 3: Adaptation of the Terminology of Eucharistic Objects

The description of Corpus Christi processions contains two coordinated Spanish terms: *del cuidado de las custodias y de los expositores*

The translation of these nouns demonstrates how ecclesiastical material culture is reorganized across languages.

Language	Equivalent
Spanish	<i>las custodias y los expositores</i>
Italian	<i>gli ostensori e gli espositori</i>
Portuguese	<i>as custódias e os ostensórios</i>
French	<i>les ostensoirs et leur exposition</i>
Polish	<i>monstrancje i trony eucharystyczne</i>
English	<i>monstrances and stands</i>

In this context, *custodia* refers to the liturgical vessel used to display the consecrated Host during adoration and Eucharistic processions. *Expositor* refers to an object or supporting structure connected with its display.

Italian renders the pair as: *ostensori ed espositori*. The term *ostensorio* corresponds functionally to Spanish *custodia*. It derives from the semantic field of showing or displaying. The term *espositore* remains morphologically close to Spanish *expositor*.

Italian therefore preserves the two-object structure but changes the first noun from a culturally established Spanish term to the conventional Italian term for the Eucharistic vessel. This is a case of terminological substitution without referential change.

Portuguese uses: *custódias e ostensórios*. The first term formally preserves Spanish *custodias*. The second, *ostensórios*, normally belongs to the same general liturgical domain as the Eucharistic vessel. Compared with Spanish, the distinction between vessel and display structure becomes less transparent. Spanish *expositores* is not reproduced by the formal equivalent *expositores*. Instead, Portuguese introduces *ostensórios*.

This may be classified as terminological redistribution: the translation preserves two liturgical nouns but reorganizes their lexical relationship.

French renders the expression as: *du soin apporté aux ostensoirs et à leur exposition*

The first element, *ostensoirs*, refers to the liturgical vessels. The second Spanish object, *expositores*, is replaced with the abstract action noun *exposition*. The French version consequently refers to the care devoted to the monstrances and to their exposition, rather than to the monstrances and the physical stands used to display them.

The semantic field remains Eucharistic, but the material reference becomes less specific. This constitutes implicitation of the physical object accompanied by nominal abstraction.

Polish uses: *monstrancje i trony eucharystyczne*

The first noun is the established Polish term for the vessel displaying the consecrated Host. The second means “Eucharistic thrones.” The adjective *eucharystyczne* is an explication without a direct equivalent in Spanish. It clarifies the liturgical function of the supporting structures. The noun *trony* also introduces an image of enthronement absent from the neutral Spanish *expositores*.

The shift can be classified as: terminological substitution; liturgical explication; metaphorical specification.

The object is not merely a stand but a “throne,” which can evoke honour, elevation and royal display.

English uses: *monstrances and stands*

The first term is technically precise. The second, *stands*, is a general material noun. It communicates the supportive function of the objects but does not independently mark their Eucharistic purpose. This represents functional generalization: The context supplies the missing specification because *stands* directly follows *monstrances*.

Case 5: Adaptation of the Water and Aridity Metaphor

The concluding section develops an extended metaphor in which the Eucharistic Christ is a hidden source whose water reaches the dryness of the human heart and then flows towards others.

The Spanish passage states: “*dejemos que hidrate las sequedades de nuestro corazón, para salir después a los caminos de la vida y de la historia y llevar entre la gente esta corriente de agua fresca, corriente de amor, de paz, de justicia y de alegría. Bebamos de nuevo de esta fuente eucarística, que no nos encierra en una devoción privada, sino que nos envía a regar a los hermanos, a las familias, a los pobres, a quienes sufren, a quienes han perdido la esperanza.*”

The dryness of the heart

Language	Equivalent
Spanish	<i>hidrate las sequedades de nuestro corazón</i>
Italian	<i>disseti le aridità del nostro cuore</i>
Portuguese	<i>hidrate as aridezes do nosso coração</i>
French	<i>désaltérer les aridités de notre cœur</i>
Polish	<i>nawodnił wyschłe obszary naszego serca</i>
English	<i>quench the thirst of our hearts</i>

Portuguese provides the closest formal equivalent: *hidrate* - *hidrate*; *sequedades* *aridezes*; *nuestro corazón* *nosso coração*.

The version preserves both the action of hydration and the nominalized dryness of the heart.

Italian *dissetare* and French *désaltérer* mean “to quench thirst.” Their grammatical objects, however, remain *aridità/aridités*, “aridities.” The formulation therefore personifies dryness as something capable of experiencing thirst: *dissetare le aridità*; *désaltérer les aridités*. Spanish conceptualizes Christ’s action as adding moisture to dryness. Italian and French conceptualize it as satisfying the thirst represented by dryness.

Polish renders the expression as: *nawodnił wyschłe obszary naszego serca*

This means “water/irrigate the dried areas of our heart.” The abstract Spanish plural *sequedades* becomes the concrete spatial phrase *wyschłe obszary*, “dried areas.”

The adaptation involves: concretization; spatial explicitation; replacement of an abstract noun with an adjective–noun phrase. The heart is more explicitly conceptualized as territory containing dry regions. This spatial image connects naturally with the subsequent references to roads, streams and irrigation.

English uses: *quench the thirst of our hearts*

The explicit noun corresponding to Spanish *sequedades* disappears. The entire heart becomes the experiencer of thirst.

This is a more substantial modulation:

Spanish	English
heart contains areas of dryness	heart experiences thirst
Christ hydrates	Christ quenches
spatial-material state	physiological need

The Eucharistic source continues to provide water, but the recipient is reconfigured from “dryness” to “the heart.”

Drinking from the Eucharistic source

Spanish	Italian	Portuguese	French	Polish	English
<i>Bebamos de nuevo</i>	<i>Abbeveriamoci di nuovo</i>	<i>Bebamos novamente</i>	<i>Buvons à nouveau</i>	<i>Zaczerpnijmy na nowo</i>	<i>Let us drink anew</i>

Most versions retain the first-person plural exhortation and the act of drinking. Polish *zaczerpnijmy* means “let us draw” or “let us take from the source.” It preserves the source

image but does not specify drinking directly.

All versions retain the communal imperative. The speaker includes himself among those who require renewed Eucharistic nourishment.

Watering or refreshing others

Language	Equivalent
Spanish	<i>nos envía a regar a los hermanos</i>
Italian	<i>ci manda a irrigare i fratelli</i>
Portuguese	<i>nos envia para regar os irmãos</i>
French	<i>nous envoie arroser nos frères</i>
Polish	<i>posyła nas, abyśmy nieśli orzeźwienie naszym braciom i siostram</i>
English	<i>sends us out to refresh our brothers and sisters</i>

Italian, Portuguese and French preserve the verb of watering: *irrigare*; *regar*; *arroser*.

In these versions, human recipients remain metaphorically conceptualized as terrain or plants requiring water. Polish and English replace irrigation with refreshment: *nieśli orzeźwienie* “bring refreshment”; *to refresh*.

The change reduces the agricultural component but makes the beneficial effect on human recipients more direct. The recipients are no longer objects being watered; they are people receiving relief and renewal.

Polish and English also use gender-inclusive pairs: *braciom i siostram*; *brothers and sisters*.

Spanish *hermanos* is grammatically masculine but can function generically. The explicit addition of “*sisters*” constitutes gender explicitation.

Preservation and modification of the metaphorical chain

Version	Dryness/thirst	Drinking	Mission to others
Spanish	hydrate dryness	drink	water
Italian	quench aridity	drink	irrigate
Portuguese	hydrate aridity	drink	water
French	quench aridity	drink	water
Polish	water dried areas	draw	bring refreshment
English	quench thirst	drink	refresh

The complete water domain remains visible in all versions, but its internal organization changes. Portuguese follows Spanish most closely. Italian and French reinterpret dryness as thirst. Polish spatializes dryness and later replaces irrigation with refreshment. English removes dryness and foregrounds thirst and refreshment.

4. Conclusion

The comparative analysis of the official Italian, Portuguese, French, Polish and English versions of Pope Leo XIV's Corpus Christi homily demonstrates that fidelity and adaptation do not constitute mutually exclusive translation strategies. The five versions preserve the central theological and communicative identity of the Spanish reference text while employing language-specific forms of grammatical restructuring, lexical differentiation, terminological substitution and metaphorical modulation.

The translations display particularly strong fidelity in their treatment of the homily's Eucharistic and Christological content. The Eucharist remains the gift of Christ's living presence; Christ remains the living Bread who comes down from heaven and nourishes the community with divine life; the risen Lord continues to move among the people; and the Corpus Christi procession remains an expression of Christ's movement towards human life rather than an exclusively external or folkloric manifestation. These propositions are maintained across all five versions despite differences in linguistic structure.

Fidelity is also evident in the preservation of grammatical agency. Christ remains the active subject of the principal salvific actions: he offers his life, becomes bread, nourishes the community, comes out to meet it, walks through public spaces and visits the hidden areas of the human heart and history. The translations do not systematically replace these personal actions with impersonal theological abstractions. The community, expressed through first-person plural forms, remains the recipient of divine presence and the subject called to conversion and social responsibility.

The homily's metaphorical organization is similarly stable. The five versions retain the interconnected images of bread, hunger, nourishment, journey, memory, museum, school, source, thirst and water. Fidelity therefore extends beyond individual lexical equivalents. It includes the preservation of relationships between metaphors across the discourse. Bread responds to hunger, the source responds to dryness or thirst, memory prevents spiritual forgetfulness, and the school of faith transforms inherited religiosity into present action.

At the same time, the analysis identifies significant forms of adaptation. These occur at the liturgical, lexical-semantic, terminological, grammatical and metaphorical levels. Some are strongly conditioned by target-language convention. Others represent optional interpretative choices that modify the semantic profile of the Spanish expression.

This preservation is theologically significant because the homily presents the Eucharist as Christ's living and active presence. The translations maintain this personal agency rather than reducing the Eucharist to a symbol, memory or abstract religious value.

Bibliography

Books and Scholarly Publications

1. Cadier, J. (1938). La présence réelle dans le calvinisme. *Études théologiques et religieuses*, 13(6), 293–309.
2. Caspani, P. (2016). La presenza reale di Cristo nei sacramenti. *La Scuola Cattolica*, 144(2), 243–269.
3. Catford, J. C. (1965). *A linguistic theory of translation: An essay in applied linguistics*. Oxford University Press.

4. Chesterman, A. (2016). *Memes of translation: The spread of ideas in translation theory* (Rev. ed.). John Benjamins. <https://doi.org/10.1075/btl.123>
5. de Souza, A. M. N. (2024). "Presença viva de Cristo": O exercício do ministério da presidência na oração eucarística. *Medellín: Biblia, Teología y Pastoral para América Latina y El Caribe*, 50(188), 173–214.
6. Durak, A. (1999). *Uroczystość Najświętszego Ciała i Krwi Chrystusa: Analiza hermeneutyczna tekstów celebracji*. Poligrafia Salezjańska.
7. George, S., & Harold, G. (2021). Motus Dei (the move of God): A theology and missiology for a moving world. *Pharos Journal of Theology*, 102(1), 1–12.
8. Gerván, H. H. (2022). Jesús, «Pan de Vida» y «Pan Vivo»: Reflexiones exegético-teológicas de Jn 6 y sus implicancias en la educación católica. *In Itinere*, 12(1), 215–237.
9. House, J. (2024). *Translation: The basics* (2nd ed.). Routledge.
10. Kiddle, L. B. (1952). The Spanish language as a medium of cultural diffusion in the age of discovery. *American Speech*, 27(4), 241–256. <https://doi.org/10.2307/453539>
11. Kluj, W. (2013). *Kształtowanie się podstawowych tekstów wiary w języku malgaskim*. Wydawnictwo Missio-Polonia.
12. Mazzone, L. (2018). «Habeas Corpus»: Il Corpo di Cristo dalla devozione alla sua umanità al culto eucaristico (sec. VIII–XV). *Analecta Liturgica* 36.
13. Montero, P. M. (2012). Solemnidad del Corpus Christi en Badajoz: Devoción, historia y fiestas.
14. *Boletín de la Real Academia de Extremadura de las Letras y las Artes*, (20), 375–418.
15. Nida, E. A., & Taber, C. R. (1986). *La traducción: Teoría y práctica* (Vol. 2). Ediciones Cristiandad.
16. O'Malley, T. P. (2023). *Presencia real: ¿Qué significa y por qué es importante?* Ave Maria Press.
17. Pagola, J. A. (1997). La familia, «escuela de fe»: Condiciones básicas. *Sal Terrae*.
18. Perez, L. F. (2013). Fazer corpo na duração do fazer corpo. *Revista de Ciências Sociais*, 44(2), 150–166.
19. Queiroz, R. F. (2025). *Expositor: Manual de pregação expositiva: Um guia para criação de sermões expositivos e estudos bíblicos*. OPulpito.
20. Roux, L. (1975). La fête du Saint Sacrement à Séville en 1594: Essai de définition d'une lecture des formes. In *Fêtes de la Renaissance III* (pp. 461–484).
21. Schabowicz, S. (2024). The challenges of theological translation. In R. Matysik-Pejas, M. Bogusz, & P. Rachwał (Eds.), *Poszerzamy horyzonty* (Vol. 43, pp. 189–198). Mateusz Weiland Network Solutions.
22. Strzyżyński, P. A. (2014). Miłość bezinteresowna a ludzkie potrzeby. *Filozofia Chrześcijańska*, 11, 111–121.
23. van Leuven-Zwart, K. M. (1989). Translation and original: Similarities and dissimilarities, I.
24. *Target*, 1(2), 151–181. <https://doi.org/10.1075/target.1.2.03leu>
25. Willard, D. (2013). *Living in Christ's presence: Final words on heaven and the kingdom of God*. InterVarsity Press.

Magisterial and Ecclesiastical Sources

26. Congregation for Divine Worship and the Discipline of the Sacraments. (2001, March 28). *Liturgiam authenticam: Fifth instruction for the right implementation of the Constitution on the Sacred Liturgy of the Second Vatican Council*.
27. Francis. (2017, September 3). *Magnum principium: Apostolic letter issued motu proprio by which can. 838 of the Code of Canon Law is modified*.
28. Leo XIV. (2026, June 7). *Homilía del Santo Padre: Santa Misa, procesión y bendición eucarística en la solemnidad del Santísimo Cuerpo y Sangre de Cristo, Plaza de Cibeles, Madrid* [Spanish version].
29. Leo XIV. (2026, June 7). *Omelia del Santo Padre* [Italian version].
Leo XIV. (2026, June 7). *Homélie du Saint-Père* [French version].
30. Leo XIV. (2026, June 7). *Homilia do Santo Padre* [Portuguese version]. Leo XIV. (2026, June 7). *Homily of the Holy Father* [English version]. Leo XIV. (2026, June 7). *Homilia Ojca Świętego* [Polish version].

Online Lexicographical and Reference Sources Real Academia Española

31. Real Academia Española. (n.d.). *Abrir*. In *Diccionario de la lengua española*. Retrieved August 2, 2026, from RAE abrir
32. Real Academia Española. (n.d.). *Acordar*. In *Diccionario de la lengua española*. Retrieved August 2, 2026, from RAE acordar
33. Real Academia Española. (n.d.). *Agua*. In *Diccionario de la lengua española*. Retrieved August 2, 2026, from RAE agua
34. Real Academia Española. (n.d.). *Alimentar*. In *Diccionario de la lengua española*. Retrieved August 2, 2026, from RAE alimentar
35. Real Academia Española. (n.d.). *Atravesar*. In *Diccionario de la lengua española*. Retrieved August 2, 2026, from RAE atravesar
36. Real Academia Española. (n.d.). *Beber*. In *Diccionario de la lengua española*. Retrieved August 2, 2026, from RAE beber
37. Real Academia Española. (n.d.). *Brotar*. In *Diccionario de la lengua española*. Retrieved August 2, 2026, from RAE brotar
38. Real Academia Española. (n.d.). *Caminar*. In *Diccionario de la lengua española*. Retrieved August 2, 2026, from RAE caminar
39. Real Academia Española. (n.d.). *Corpus*. In *Diccionario de la lengua española*. Retrieved August 2, 2026, from RAE corpus
40. Real Academia Española. (n.d.). *Dejar*. In *Diccionario de la lengua española*. Retrieved August 2, 2026, from RAE dejar
41. Real Academia Española. (n.d.). *Fuente*. In *Diccionario de la lengua española*. Retrieved August 2, 2026, from RAE fuente
42. Real Academia Española. (n.d.). *Gratitud*. In *Diccionario de la lengua española*. Retrieved August 3, 2026, from RAE gratitud
43. Real Academia Española. (n.d.). *Habitar*. In *Diccionario de la lengua española*. Retrieved August 2, 2026, from RAE habitar

44. Real Academia Española. (n.d.). *Hidratar*. In *Diccionario de la lengua española*. Retrieved August 2, 2026, from RAE hidratar
45. Real Academia Española. (n.d.). *Llevar*. In *Diccionario de la lengua española*. Retrieved August 2, 2026, from RAE llevar
46. Real Academia Española. (n.d.). *Memoria*. In *Diccionario de la lengua española*. Retrieved August 2, 2026, from RAE memoria
47. Real Academia Española. (n.d.). *Ofrecer*. In *Diccionario de la lengua española*. Retrieved August 2, 2026, from RAE ofrecer
48. Real Academia Española. (n.d.). *Olvidar*. In *Diccionario de la lengua española*. Retrieved August 2, 2026, from RAE olvidar
49. Real Academia Española. (n.d.). *Partido*. In *Diccionario de la lengua española*. Retrieved August 2, 2026, from RAE partido
50. Real Academia Española. (n.d.). *Recuerdo*. In *Diccionario de la lengua española*. Retrieved August 2, 2026, from RAE recuerdo
51. Real Academia Española. (n.d.). *Regar*. In *Diccionario de la lengua española*. Retrieved August 2, 2026, from RAE regar
52. Real Academia Española. (n.d.). *Sed*. In *Diccionario de la lengua española*. Retrieved August 2, 2026, from RAE sed
53. Real Academia Española. (n.d.). *Se*. In *Diccionario de la lengua española*. Retrieved August 2, 2026, from RAE se
54. Real Academia Española. (n.d.). *Transformar*. In *Diccionario de la lengua española*. Retrieved August 2, 2026, from RAE transformar
55. Real Academia Española. (n.d.). *Visita*. In *Diccionario de la lengua española*. Retrieved August 2, 2026, from RAE visita
56. Real Academia Española. (n.d.). *Volver*. In *Diccionario de la lengua española*. Retrieved August 2, 2026, from RAE volver
57. Real Academia Española & Asociación de Academias de la Lengua Española. (n.d.). *Salir*. In *Diccionario panhispánico de dudas*. Retrieved August 2, 2026, from DPD salir

Cambridge Dictionary

58. Cambridge University Press & Assessment. (n.d.). *Awareness*. In *Cambridge English–Polish Dictionary*. Retrieved August 3, 2026, from Cambridge awareness
59. Cambridge University Press & Assessment. (n.d.). *Gratitude*. In *Cambridge English–Polish Dictionary*. Retrieved August 3, 2026, from Cambridge gratitude
60. Cambridge University Press & Assessment. (n.d.). *Memory*. In *Cambridge English–Polish Dictionary*. Retrieved August 3, 2026, from Cambridge memory
61. Cambridge University Press & Assessment. (n.d.). *Recall*. In *Cambridge English–Polish Dictionary*. Retrieved August 3, 2026, from Cambridge recall
62. Cambridge University Press & Assessment. (n.d.). *Remember*. In *Cambridge English–Polish Dictionary*. Retrieved August 3, 2026, from Cambridge remember

Larousse

63. Larousse. (n.d.). *Arroser*. In *Dictionnaire de français Larousse*. Retrieved August 3, 2026, from Larousse arroser

64. Larousse. (n.d.). *Gratuité*. In *Dictionnaire de français Larousse*. Retrieved August 3, 2026, from Larousse gratuité
65. Larousse. (n.d.). *Jaillir*. In *Dictionnaire de français Larousse*. Retrieved August 3, 2026, from Larousse jaillir
66. Larousse. (n.d.). *Mémorial*. In *Dictionnaire de français Larousse*. Retrieved August 3, 2026, from Larousse mémorial

Priberam

67. Priberam Informática. (n.d.). *Gratidão*. In *Dicionário Priberam da Língua Portuguesa*. Retrieved August 3, 2026, from Priberam gratidão
68. Priberam Informática. (n.d.). *Memória*. In *Dicionário Priberam da Língua Portuguesa*. Retrieved August 3, 2026, from Priberam memória

Treccani

69. Istituto della Enciclopedia Italiana. (n.d.). *Corpus Domini*. In *Treccani*. Retrieved August 2, 2026, from Treccani Corpus Domini
70. Istituto della Enciclopedia Italiana. (n.d.). *Gratuità*. In *Treccani*. Retrieved August 3, 2026, from Treccani gratuità
71. Istituto della Enciclopedia Italiana. (n.d.). *Irrigare*. In *Treccani*. Retrieved August 3, 2026, from Treccani irrigare
72. Istituto della Enciclopedia Italiana. (n.d.). *Memoria*. In *Treccani*. Retrieved August 3, 2026, from Treccani memoria

PWN

73. Wydawnictwo Naukowe PWN. (n.d.). *Boże Ciało*. In *Słownik języka polskiego PWN*. Retrieved August 2, 2026, from SJP PWN Boże Ciało
74. Wydawnictwo Naukowe PWN. (n.d.). *Pamiątka*. In *Słownik języka polskiego PWN*. Retrieved August 3, 2026, from SJP PWN pamiątka
75. Wydawnictwo Naukowe PWN. (n.d.). *Rozkwitać*. In *Słownik języka polskiego PWN*. Retrieved August 2, 2026, from SJP PWN rozkwitać

18. HOW ARE BIBLICAL BOOK ABBREVIATIONS RENDERED IN TAGALOG CATHOLIC BIBLE TRANSLATIONS?

Stanisław Schabowicz

PhD Student in Theology Faculty of Theology

Cardinal Stefan Wyszyński University in Warsaw, Poland

PhD Student in Spanish: Linguistics, Literature and Communication Department of Spanish Language, University of Valladolid, Spain

<https://orcid.org/my-orcid?orcid=0000-0002-1140-230X>

1. Introduction

The *Catechism of the Catholic Church* occupies a distinctive place within the system of texts that constitute Catholic theological discourse. It is neither a translation of the Bible, an exegetical commentary, nor a collection of autonomous dogmatic definitions. Rather, it is an ordered synthesis of doctrine whose purpose is to present the content of faith through the organic relationship among Sacred Scripture, Apostolic Tradition, the liturgy, the teaching of the Magisterium, and the Christian moral life. Its text is simultaneously doctrinal, biblical, catechetical, and pastoral in character.

This status means that the catechism replaces neither Sacred Scripture nor local catechesis. It serves as a reference text on the basis of which catechisms adapted to different linguistic, cultural, and pastoral contexts may be prepared. The universality of its doctrinal content does not preclude linguistic localization. On the contrary, the effective transmission of the deposit of faith requires theological content to be made accessible in the language through which a particular community names religious experience, interprets the Bible, and articulates its own response of faith.

The presence of the Tagalog *Katesismo ng Iglesia Katolika (KIK)* must be interpreted within the much longer history of Christian writing in the Philippines. One of the most important landmarks in this history was the *Doctrina Christiana en lengua española y tagala*, published in Manila in 1593. The Library of Congress identifies it as the first book printed in the Philippines. The text was presented in Spanish and Tagalog, with the Tagalog version printed both in the Latin alphabet and in the baybayin script (Library of Congress, 1593/1947).

The significance of the *Doctrina Christiana* is not limited to its chronological priority in the history of Philippine printing. The first locally printed book was also a catechism. Consequently, catechetical texts occupy a foundational position in the Philippine history of writing, religious education, and language standardization. From its beginnings, printed Tagalog was linked to the transmission of prayers, truths of faith, moral principles, and sacramental practices.

Catechisms may therefore be described as one of the principal and most enduring instruments in the formation of the Catholic religious imagination in the Philippines. They transmitted not only doctrinal definitions, but also prayer formulas, moral categories, models

of sacramental practice, and linguistic means of naming the relationship between the human person and God. Through catechesis, individuals acquired a specific repertoire of words, utterances, and textual structures by means of which they could profess the faith, recognize sin, participate in the liturgy, and interpret their obligations toward the community.

The Siglum as an Element in the Organization of Theological Knowledge

In the KIK, sigla perform a function considerably broader than the technical abbreviation of book names. They constitute an element in the organization of theological knowledge. Each siglum condenses the name of a book and permits numerous biblical references to be introduced without excessively expanding the main text.

The first element identifies the book, the second indicates its internal division, and the third locates a specific textual unit. The siglum thus performs a lexical-identificatory function, whereas the numerals perform a locative function.

The reader is not required to know the abbreviations before beginning to read. The publication itself provides an interpretative key. The list therefore performs a pedagogical function by introducing the reader to the conventions of specialized biblical notation.

At the same time, sigla visually distinguish biblical references from references to ecclesiastical documents. On the following introductory pages, the KIK includes a separate *Talaan ng mga Dokumento Ecclesiastiko*, containing, among others, the abbreviations *DV*, *LG*, *SC*, *GS*, and *EN* (KIK, 1996, pp. xxi–xxii). The publication thus constructs two parallel reference systems.

The principal aim of this study is to identify and linguistically analyze the system of biblical-book sigla included in the Tagalog *Katesismo ng Iglesia Katolika*. The analysis seeks to determine which reduction mechanisms were employed in forming the sigla.

The primary corpus is the closed inventory contained in the *Talaang Alpabetiko ng mga Aklat ng Biblia* on page xx of the KIK. Each entry consists of two elements. Examples include *Gn–Genesis*, *Blg–Mga Bilang*, *Hkm–Mga Hukom*, *Kar–Karunungan*, *Mt–San Mateo*, *Gwa–Mga Gawa ng mga Apostol*, and *Ap–Apocalipsis (pahayag)* (KIK, 1996, p. xx).

The method is descriptive. Its purpose is neither to propose a more regular system nor to evaluate how the abbreviations ought to appear. The analysis reconstructs rules from the forms actually attested.

The linguistic perspective is combined with theological and textual analysis. The sigla are interpreted as elements of the catechism's text, linking doctrinal exposition with the canonical text of Sacred Scripture. This approach avoids two reductions: treating the sigla exclusively as neutral technical signs and treating the catechism exclusively as an abstract collection of dogmatic propositions.

2. Linguistic Analysis of the Biblical-Book Sigla in the *Katesismo ng Iglesia Katolika*

Unlike acronyms, sigla do not have to form new units intended to be pronounced as independent words. Their principal purpose is to represent names graphically within a specialized reference system. Their analysis must therefore take into account not only the number of letters retained, but also their positions within the base form, their distinctive value, and their relationship to other abbreviations in the same inventory (Cannon, 1989, pp. 99–103; López Rúa, 2002, pp. 31–36).

The KIK system encompasses the books of the Old and New Testaments, including the deuterocanonical books. It is therefore not an incidental set of the most frequently cited forms, but a complete inventory designed to support biblical references throughout the catechism. It contains sigla for single- and multiword names, numbered forms, names containing the Tagalog marker *mga*, names with the designations *Aklat* and *Sulat*, and titles containing the honorific *San* (KIK, 1996, p. xx).

General Formal Properties of the System

The KIK system is not based on a single rule prescribing a fixed siglum length. It includes:

- two-letter forms: *Gn, Ex, Lv, Dt, Tb, Jb, Is, Ez, Dn, Os, Jl, Am, Na, So, Ag, Za, Mt, Mc, Lc, Jn, Ef, Ap*;
- three-letter forms: *Jos, Hkm, Rut, Esd, Neh, Jdt, Est, Slm, Kaw, Ecl, Kar, Sir, Jer, Pan, Bar, Abd, Jon, Miq, Hbc, Mal, Rom, Cor, Gal, Flp, Col, Tes, Tit, Flm, Heb, Snt, Ped, Jud*;
- the four-letter form *Awit*;
- constructions containing a numeral: *1 Sm, 3 Hri, 1 Mcb, 2 Cor, 1 Tm, 3 Jn*;
- sigla with a three-letter segment following the numeral: *Hri, Par, Mcb, Cor, Tes, Ped*.

The absence of uniform length does not entail the absence of systematicity. In specialized systems of abbreviation, the primary criterion is not absolute symmetry but a balance between economy and identifiability. A form must be sufficiently short yet distinctive enough to be differentiated from the remaining abbreviations (Mattiello, 2013, pp. 64–71).

In the KIK, both the initial letters of the base form and selected consonants serve this purpose. Some sigla retain a continuous initial sequence from the name, whereas others eliminate internal vowels. In multiword names, reduction affects entire grammatical components.

Reduction to an Initial Segment

The first fundamental mechanism consists in retaining a continuous initial segment of the full name and deleting its final portion. Not all the forms listed preserve the first three letters without modification. *Snt* omits the vowel *a* and therefore belongs to a mixed model. Other forms, such as *Jos, Esd, Neh, Est, Kar, Jer, Pan, Rom, Gal*, and *Col*, transparently retain a continuous initial segment.

Initial reduction has a high recognition value because the identification process begins with the same letter sequence in the full and shortened forms. A reader who recognizes *Jer* can directly associate the siglum with the beginning of *Jeremias*. The mechanism requires neither letter transposition nor knowledge of an additional code.

The length of the retained segment nevertheless depends on the needs of the system. The material therefore does not indicate a rule requiring an exclusively two- or three-letter structure. The choice remains linked to conventionality and the distinctiveness of the form.

Consonantal Reduction

The second mechanism consists in retaining selected consonants from the base form while deleting some or all internal vowels. The siglum is then not a continuous beginning of the full name, but its condensed graphemic skeleton.

In *Blg*, the consonants ⟨b-l-g⟩ are retained and the vowels ⟨i-a⟩ deleted. In *Hkm*, the sequence ⟨h-k-m⟩ remains after the deletion of ⟨u-o⟩. The order of the letters remains consistent with the base form; reduction does not alter their sequence.

In these cases, the siglum selects consonants characteristic of the name without preserving its complete syllabic onset. This reduction increases graphic economy, but requires greater familiarity with the convention than the simple retention of the beginning of a name.

The element *San* is omitted entirely, while each proper name is represented by two consonants. *Mt* retains ⟨m-t⟩ from *Mateo*, *Mc* retains ⟨m-c⟩ from *Marcos*, *Lc* retains ⟨l-c⟩ from *Lucas*, and *Jn* retains ⟨j-n⟩ from *Juan*. The sigla form an internally regular four-member series: each consists of two letters, begins with the initial of the personal name, and omits the title *San* (KIK, 1996, p. xx)

The Status of Vowels in the Structure of the Sigla

Vowels are not consistently eliminated in the KIK system. In some forms, they remain part of the siglum:

- *Jos, Neh, Kaw, Kar, Jer, Pan, Rom, Gal, Col.*

In others, they are deleted:

- *Blg, Hkm, Gn, Dt, Dn, Hbc, Flp, Flm, Snt.*

It is therefore impossible to posit a general rule reducing every name to a consonantal skeleton. This is one strategy used alongside initial shortening. The choice of model is determined by the established form and the need to preserve recognizability.

From the perspective of Tagalog syllable structure, forms such as *Blg* and *Hkm* do not correspond to independent syllables in the language. They are not intended to function as ordinary phonological words. Their primary domain is written language. This confirms the graphemic rather than lexical character of the sigla: users are expected to recognize and expand them, not necessarily pronounce them as autonomous units.

Elimination of the Tagalog Marker *mga*

The marker *mga* occurs in several full book names: *Mga Bilang*; *Mga Hukom*; *Mga Salmo*; *Mga Kawikaan*; *Mga Panaghoy*; *Mga Gawa ng mga Apostol*.

The elimination of *mga* is systematic and functionally motivated. The marker indicates plurality but does not identify a particular book. If sigla were formed from the first component of the entire phrase, all the names listed above would share the same base, *Mga*. This would neutralize the distinctions among the books.

The nouns *Bilang*, *Hukom*, *Salmo*, *Kawikaan*, *Panaghoy*, and *Gawa* carry distinctive value. The plural marker belongs to the full grammatical structure of the title, but not to its minimal identificatory representation.

This phenomenon demonstrates that the formation of sigla does not consist in mechanically preserving the first letters of the entire name. It requires recognition of the

name's syntactic structure and the semantic hierarchy of its components. The KIK system selects the lexical element and omits the functional one.

Elimination of Function Words

In addition to *mga*, extended book names contain the Tagalog elements *ng*, *ni*, *kay*, and *sa*. None is transferred into the siglum. Reduction therefore requires syntactic analysis: the system distinguishes the element naming the textual genre, the element expressing a grammatical relation, and the element indicating the addressee or author that forms the basis of identification.

Elimination of the Elements *Aklat* and *Sulat*

The full names in the KIK contain generic designations: *Aklat* "book"; *Sulat* "letter" or "epistle." They are not retained in the sigla. The nouns *Aklat* and *Sulat* classify a text but do not individualize it. The system contains many books and many letters; retaining the first letters of these designations would therefore produce numerous collisions. Identification is supplied only by the elements *Samuel*, *Hari*, *Paralipomeno*, *Tesalonisense*, *Timoteo*, *Pedro*, or *Juan*.

Elimination of the Title *San*

The honorific *San* occurs in the full names of the Gospels and the letters associated with Peter and John: *San Mateo*; *San Marcos*; *San Lucas*; *San Juan*; *1 Sulat ni San Pedro*; *1 Sulat ni San Juan*.

The title *San* has religious meaning and indicates the person's status in the tradition of the Church. It has no distinctive value, however, because it is shared by several names. Its elimination does not remove information required to identify the book.

The KIK does not omit *San* from the full names. The element is removed only at the level of the siglum. The system therefore maintains a distinction between the full theological-honorific form and the minimal bibliographic form.

Sigla for Numbered Books

The names of books belonging to a series use a construction composed of a numeral, a space, and a letter segment.

The numeral is not a reducible addition. It distinguishes books within the same series. Without the numeral, the forms *Sm*, *Cor*, *Tm*, *Ped*, and *Jn* would indicate only a family of texts, not a specific book.

The KIK uses Arabic numerals rather than Tagalog ordinal numerals. The full name likewise begins with a numeral: *1 Aklat ni Samuel*, rather than *Unang Aklat ni Samuel*. This solution increases graphic economy and preserves formal parallelism between the full name and the siglum. A space between the numeral and the letter segment is used consistently. Forms such as *ISm* or *ICor* are not attested in the list.

Historical Numbering of the Books of Samuel and Kings

The most distinctive forms in the KIK system are:

- *1 Sm* — *1 Aklat ni Samuel*;

- 2 *Sm* — 2 *Aklat ni Samuel*;
- 3 *Hri* — 3 *Aklat ng mga Hari*;
- 4 *Hri* — 4 *Aklat ng mga Hari*.

Contemporary biblical lists usually designate the Books of Kings as First and Second Kings. The KIK, however, employs the numerals three and four. This arrangement preserves an older tradition in which the Books of Samuel and the Books of Kings were treated as a four-part collection of the Books of Kingdoms or Kings. Under this system, the books of Samuel occupied the first and second positions, while the books now called First and Second Kings occupied the third and fourth.

The KIK does not call the books of Samuel *1–2 Hari*, but retains the name *Samuel*. The numbering *3–4 Hri* is therefore a trace of an earlier system rather than a fully symmetrical modern naming arrangement.

This feature is significant both linguistically and textually. It demonstrates that sigla may preserve an older tradition of organizing the canon even when the remaining elements of the name are expressed in Tagalog.

The Forms *1 Par* and *2 Par*

The Books of Chronicles appear under the names: *1 Aklat ng Paralipomeno*; *2 Aklat ng Paralipomeno*, with the sigla *1 Par* and *2 Par*. The base *Paralipomeno* represents the traditional name of these books known from the Greek-Latin biblical tradition. The siglum *Par* retains the first three letters of this base. The Tagalog components *Aklat ng* are omitted.

These forms demonstrate the coexistence of Tagalog syntax and inherited canonical terminology. The full name is embedded in a Tagalog nominal construction, whereas the siglum is based on the traditional identifying lexeme.

A Complete Lexeme as a Siglum: *Awit*

Unlike *Blg*, *Hkm*, *Mt*, or *Kar*, the form *Awit* is not the result of word-internal reduction. The head noun is retained in full, while the expression *ng mga Awit* is omitted.

The retention of the complete lexeme may result from its short length and high recognizability. Shortening it to two or three letters is not required to achieve graphic economy. At the same time, the full form *Awit* distinguishes the Song of Songs from *Mga Salmo*, represented by the siglum *Slm*.

This distinction is particularly important because Tagalog *awit* can mean “song,” while the Psalms likewise belong to poetic and sung texts. Thus, no homonymy of sigla arises despite the semantic proximity of the full names.

Sigla of the Deuterocanonical Books

These forms represent several mechanisms. *Kar* and *Bar* retain the first three letters of the name. *Tb*, *Jdt*, and *Mcb* have a consonantal structure. *Sir* retains the beginning of the primary name *Sirac*, although the full form also contains the variant *Ecclesiastico* in parentheses.

The choice of *Sir*, rather than an abbreviation formed from *Ecclesiastico*, indicates a hierarchy among naming variants. *Sirac* is the primary form, whereas *Ecclesiastico* functions as an explanatory variant. Likewise, the siglum *Ap* is formed from the primary name *Apocalipsis*, not from the parenthetical Tagalog *pahayag*.

Alternative Names in Parentheses

Three full names contain additional parenthetical designations: *Eclesiastes (cohelet)*; *Sirac (Ecclesiastico)*; *Apocalipsis (pahayag)*. The parenthetical element performs an explanatory or variant function but does not form the basis of the abbreviation. This solution permits one identifier to be retained even when two names of a book coexist.

The Gospels as a Regular Subsystem

The four Gospels form one of the most regular subsystems. Its regularity includes: an identical length of two letters; omission of *San*; retention of the initial of the personal name; selection of one additional consonant; absence of a full stop; uniform capitalization.

The forms are not produced by retaining the first two letters. If initial reduction were applied, the expected forms would be *Ma*, *Ma*, *Lu*, and *Ju*. Such a system would create a collision between *Mateo* and *Marcos*.

The selection of different internal consonants maximizes distinctiveness while maintaining minimal length.

Pauline and Catholic Epistles

The names of the letters display two models of full representation. Some names are already shortened at the title level: *Romano*; *Corintio*; *Galata*; *Efesio*; *Filipenses*; *Colosense*; *Hebreo*.

Others have an expanded structure: *Sulat sa mga Tesalonicense* *Sulat kay Timoteo*; *Sulat ni San Pedro*; *Sulat ni San Juan*.

Regardless of the structure of the full name, the siglum is based on the name of the addressee or author.

The system therefore omits the generic information conveyed by *Sulat*, while retaining the personal or ethnogeographical element that individualizes the book.

There is also a noteworthy variation in length:

- two letters: *Ef*, *Tm*, *Jn*;
- three letters: *Rom*, *Cor*, *Gal*, *Flp*, *Col*, *Tes*, *Tit*, *Flm*, *Heb*, *Snt*, *Ped*, *Jud*.

No single rule of length applies to the entire group. The system combines traditional abbreviations with forms constructed from local full names

The Problem of the Form *1 Tes*

The most important inconsistency in the list concerns the Letters to the Thessalonians.

Two identical sigla therefore refer to two different books. This violates the fundamental function of an abbreviation system: the unambiguous identification of the referent. A corrected model would correspond to the pairs *1-2 Cor*, *1-2 Tm*, *1-2 Ped*, and *1-2 Mcb*. The second form may therefore be interpreted, with a high degree of probability, as a typesetting or proofreading error. Nevertheless, *2 Tes* cannot be presented as a form attested on page xx. In a critical transcription, the correct notation is:

1 Tes — *2 Sulat sa mga Tesalonisense* [sic]

The commentary may then state: systemically expected form: **2 Tes* The distinction between the source form and an editorial reconstruction is essential to maintaining empirical reliability.

Absence of Full Stops

All biblical sigla in the analyzed list are written without full stops: *Gn*, not *Gn.*; *Mt*, not *Mt.*; *Jer*, not *Jer.*; *I Cor*, not *I Cor.*; *Ap*, not *Ap.*.

The absence of a full stop is systematic. The abbreviated status of each form follows from its position in the list and from the context of the biblical reference. A full stop is not required to distinguish a siglum from an ordinary word.

This convention increases the typographic compactness of biblical references. It is also relevant to the evaluation of variation: the appearance of a form with a full stop in the main text would constitute a departure from the norm presented in the official list.

Capitalization

The letter forms begin with an uppercase letter followed by lowercase letters: *Gn*, *Blg*, *Hkm*, *Kar*, *Rom*, *Gwa*.

All-capital forms such as *GN*, *BLG*, or *ROM* are not used. The sigla thus preserve a graphic resemblance to abbreviated proper names rather than to institutional acronyms.

The capitalization system is regular. *Awit* is the only form retaining the complete lexeme, but it follows the same pattern: an initial uppercase letter followed by lowercase letters.

Relationship between the Sigla and the Tagalog Language

The KIK system cannot be regarded either as wholly indigenous or as mechanically borrowed from a single European language. Its structure is mixed. The system thus reflects the structure of Tagalog theological language itself, in which indigenous lexemes coexist with names inherited from the Christian tradition. The sigla do not eliminate this stratification; they condense it. The analyzed system is regular at several levels. The following are regularly omitted: *mga*; *ng*, *ni*, *kay*, *sa*; *Aklat*; *Sulat*; *San*.

The following are regularly retained: numerals designating numbered books; the first graphic element of the lexical base; the original order of the selected letters; initial capitalization; the absence of a full stop.

The system is not uniform with respect to: the number of letters; the retention or deletion of vowels; the use of initial or consonantal abbreviation; the retention of a complete lexeme in *Awit*; the historical numbering 3–4 *Hri*; the erroneous repetition of *I Tes*.

The system therefore displays functional regularity and partial formal regularity. With the exception of the problematic second *I Tes*, each siglum identifies one book. The mechanisms by which this identification is achieved nevertheless remain diverse.

3. Conclusion

The analysis of the sigla contained in the *Talaang Alpabetiko ng mga Aklat ng Biblia* leads to several principal findings.

Firstly, the system encompasses the complete Catholic inventory of books, including the deuterocanonical texts. Its structure therefore corresponds to the canonical scope of the catechism under examination.

Secondly, the sigla are formed through several mechanisms: initial reduction, consonantal selection, syntactic reduction, and retention of a complete lexeme.

Thirdly, in multiword names, the system consistently eliminates elements with low identificatory value: *mga*, *ng*, *ni*, *kay*, *sa*, *Aklat*, *Sulat*, and *San*. The basis of a siglum is the noun, personal name, or addressee designation that distinguishes the book from the others.

Fourthly, the forms *Blg*, *Hkm*, *Kaw*, *Pan*, and *Gwa* demonstrate that the system draws on Tagalog lexical bases. It is not merely a collection of abbreviations borrowed from English, Latin, or Spanish.

Fifthly, the historical numbering *3 Hri* and *4 Hri* and the names *1–2 Paralipomeno* document the presence of an older tradition of canonical organization.

Sixthly, the system is consistent in its absence of full stops, its capitalization, and its use of a space after a numeral. It is not, however, entirely uniform in length or in the method of letter selection.

Seventhly, the duplicated form *1 Tes* constitutes a genuine inconsistency in the source. The probable form *2 Tes* may be identified only as a reconstruction, not as a siglum actually printed in the source.

Ultimately, the KIK system may be characterized as linguistically mixed, morphologically diverse, yet fundamentally coherent in functional terms. Its form reflects the simultaneous operation of Tagalog linguistic structure, historical Catholic terminology, biblical convention, and the pastoral need to provide readers with concise access to the text of Sacred Scripture.

Bibliography:

The normative source text

1. Catholic Church. 1992. *Catechismus Catholicae Ecclesiae*. Vatican City: Libreria Editrice Vaticana.
2. Catholic Church. 1994. *Catechism of the Catholic Church*. English translation. Liguori, MO: Liguori Publications.
3. Catholic Church. 1996. *Katesismo ng Iglesia Katolika*. Manila: Roman Catholic Archdiocese of Manila.
4. Catholic Church. 1997. *Catechismus Catholicae Ecclesiae*. Editio typica. Vatican City: Libreria Editrice Vaticana.
5. John Paul II. 1992. Apostolic Constitution *Fidei depositum* on the Publication of the *Catechism of the Catholic Church*. Vatican City: Libreria Editrice Vaticana.
6. John Paul II. 1997. Apostolic Letter *Laetamur magnopere* Approving and Promulgating the Latin Typical Edition of the *Catechism of the Catholic Church*. Vatican City: Libreria Editrice Vaticana.

Tagalog and Filipino Bible Editions

7. Abriol, J. C. P. (Trans.). (2000). *Ang Banal na Biblia*. Daughters of St. Paul.
8. Claretian Publications. (1990). *Ang Biblia ng Sambayanang Pilipino*. Claretian Publications.
9. Philippine Bible Society. (2018a). *May They Be One Bible: Magandang Balita Biblia, Catholic edition*. Philippine Bible Society.

Tagalog Bible Translation and Filipino Christian Language

10. Catholic Bishops' Conference of the Philippines. (1997). *Catechism for Filipino Catholics*. Word & Life Publications.
11. del Corro, A. (2020). The Pinoy Version: A revelation. *The Bible Translator*, 71(1), 77–90. <https://doi.org/10.1177/2051677020906450>
12. Rafael, V. L. (1988). *Contracting colonialism: Translation and Christian conversion in Tagalog society under early Spanish rule*. Cornell University Press.
13. Rafael, V. L. (2005). *The promise of the foreign: Nationalism and the technics of translation in the Spanish Philippines*. Duke University Press.
14. Wolf, E., II. (Ed.). (1947). *Doctrina Christiana: The first book printed in the Philippines, Manila, 1593*. Library of Congress. Retrieved August 8, 2026, from <https://www.loc.gov/item/47031470/>

Tagalog Language and Biblical Nomenclature

15. Blake, F. R. (1925). *A grammar of the Tagalog language*. American Oriental Society.
16. Bloomfield, L. (1917). *Tagalog texts with grammatical analysis*. University of Illinois.
17. English, L. J. (1986). *Tagalog–English dictionary*. Congregation of the Most Holy Redeemer.
18. Gonzalez, A. (1998). The language planning situation in the Philippines. *Journal of Multilingual and Multicultural Development*, 19(5–6), 487–525. <https://doi.org/10.1080/01434639808666365>
19. Himmelmann, N. P. (2005). Tagalog. In A. Adelaar and N. P. Himmelmann (Eds.), *The Austronesian languages of Asia and Madagascar* (pp. 350–376). Routledge.
20. Komisyon sa Wikang Filipino. (2014). *Ortograpiyang pambansa*. Komisyon sa Wikang Filipino.
21. McFarland, C. D. (2004). The Philippine language situation. *World Englishes*, 23(1), 59–75. <https://doi.org/10.1111/j.1467-971X.2004.00335.x>
22. Ramos, T. V. (1971). *Tagalog structures*. University of Hawaii Press.
23. Ramos, T. V., and de Guzman, V. P. (1971). *Tagalog for beginners*. University of Hawaii Press.
24. Rubino, C. R. G. (2002). *Tagalog–English/English–Tagalog standard dictionary*. Hippocrene Books.
25. Schachter, P., and Otones, F. T. (1972). *Tagalog reference grammar*. University of California Press.
26. Wolff, J. U., Centeno, D. R., and Rau, D. P. (1965). *Beginning Tagalog: A course for speakers of English*. Yale University Press.

Biblical Canon, Book Names, and Textual Organisation

27. Barton, J. (1997). *The spirit and the letter: Studies in the biblical canon*. SPCK.
28. Barton, J. (2019). *A history of the Bible: The book and its faiths*. Allen Lane.
29. Brown, R. E. (1997). *An introduction to the New Testament*. Doubleday.
30. Childs, B. S. (1979). *Introduction to the Old Testament as Scripture*. Fortress Press.
31. Collins, J. J. (2018). *Introduction to the Hebrew Bible* (3rd ed.). Fortress Press.

32. McDonald, L. M. (2007). *The biblical canon: Its origin, transmission, and authority* (3rd ed.). Hendrickson.
33. McDonald, L. M. (2017). *The formation of the biblical canon* (Vols. 1–2). Bloomsbury T&T Clark.
34. Metzger, B. M. (1987). *The canon of the New Testament: Its origin, development, and significance*. Clarendon Press.
35. Schniedewind, W. M. (2004). *How the Bible became a book: The textualization of ancient Israel*. Cambridge University Press.
36. Tov, E. (2012). *Textual criticism of the Hebrew Bible* (3rd ed.). Fortress Press.
37. Wegner, P. D. (2006). *A student's guide to textual criticism of the Bible: Its history, methods, and results*. IVP Academic.

Biblical References and Abbreviation Standards

38. Alexander, P. H., Baker, D. L., Alexander, P., and Waltke, B. K. (Eds.). (1999). *The SBL handbook of style: For Ancient Near Eastern, biblical, and early Christian studies*. Hendrickson.
39. The University of Chicago Press Editorial Staff. (2017). *The Chicago manual of style* (17th ed.). University of Chicago Press.
40. United Bible Societies. (1987). *Guidelines for interconfessional cooperation in translating the Bible*. United Bible Societies.

Bible Translation Theory

41. Barnwell, K. (1986). *Bible translation: An introductory course in translation principles* (3rd ed.). Summer Institute of Linguistics.
42. Beekman, J., and Callow, J. (1974). *Translating the Word of God*. Zondervan.
43. de Waard, J., and Nida, E. A. (1986). *From one language to another: Functional equivalence in Bible translating*. Thomas Nelson.
44. Larson, M. L. (1998). *Meaning-based translation: A guide to cross-language equivalence* (2nd ed.). University Press of America.
45. Mojola, A. O., and Wendland, E. R. (2003). Scripture translation in the era of translation studies. In T. Wilt (Ed.), *Bible translation: Frames of reference* (pp. 1–25). St. Jerome Publishing.
46. Naudé, J. A. (2005). On the thresholds of the next generation of Bible translations: Issues and trends. *Meta*, 50(4). <https://doi.org/10.7202/019851ar>
47. Nida, E. A. (1964). *Toward a science of translating: With special reference to principles and procedures involved in Bible translating*. E. J. Brill.
48. Nida, E. A. (1975). *Componential analysis of meaning: An introduction to semantic structures*. Mouton.
49. Nida, E. A., and Louw, J. P. (1992). *Lexical semantics of the Greek New Testament: A supplement to the Greek-English lexicon of the New Testament based on semantic domains*. Scholars Press.
50. Nida, E. A., and Taber, C. R. (1969). *The theory and practice of translation*. E. J. Brill.
51. Porter, S. E., and Hess, R. S. (Eds.). (1999). *Translating the Bible: Problems and prospects*. Sheffield Academic Press.

52. Stine, P. C. (2004). *Let the words be written: The lasting influence of Eugene A. Nida*. Brill.
53. Wendland, E. R. (1985). *Language, society, and Bible translation*. Bible Society of South Africa.
54. Wendland, E. R. (2004). *Translating the literature of Scripture: A literary-rhetorical approach to Bible translation*. SIL International.
55. Wendland, E. R. (2008). *Contextual frames of reference in translation: A coursebook for Bible translators and teachers*. St. Jerome Publishing.
56. Wilt, T. (2002). A new framework for Bible translation. *Acta Theologica, Supplementum* 2, 140–163.
57. Wilt, T. (Ed.). (2003). *Bible translation: Frames of reference*. St. Jerome Publishing.

II NAUKI TECHNICZNE, ŚCISŁE ORAZ PRZYRODNICZE

1. EKSPERYMENTALNA IDENTYFIKACJA BŁĘDÓW POZYCJONOWANIA ROBOTA ASTORINO I WYZNACZENIE LOKALNEJ MACIERZY KOREKCJI

Łukasz Giza i Ksenia Ostrowska i Konrad Kobiela

Politechnika Krakowska im. Tadeusza Kościuszki

Wydział Mechaniczny

al. Jana Pawła II 37, 31-864 Kraków

E-mail: Lukasz.Giza@astor.com.pl

Streszczenie: W artykule przedstawiono eksperymentalną ocenę błędów pozycjonowania sześciokościowego robota Astorino oraz sposób wyznaczenia lokalnych korekt współrzędnych bez ingerencji w wewnętrzny model kinematyczny sterownika. Badania wykonano w pięciu punktach przestrzeni roboczej. Każdy punkt osiągnęto trzydzieści razy przy obciążeniu 1 kg, prędkości liniowej 75 mm/s i czasie stabilizacji 10 s. Rzeczywiste współrzędne końcówki roboczej rejestrowano za pomocą trackera laserowego Leica LTD840 i sondy T-Probe. Dla każdego punktu obliczono średnie błędy ze znakiem oraz odchylenia standardowe współrzędnych. Największy błąd składowy wyniósł - 5,3576 mm w osi X, natomiast wszystkie odchylenia standardowe były mniejsze niż 0,035 mm. Oznacza to, że rozrzut kolejnych najazdów był niewielki w porównaniu z przesunięciem środka chmury pomiarowej. Na tej podstawie wyznaczono pięciopunktową macierz korekcji i obliczono współrzędne skorygowane. Przedstawione wyniki potwierdzają zasadność dalszej walidacji lokalnej kompensacji w oddzielnej serii pomiarowej.

Słowa kluczowe: robot przemysłowy, dokładność pozycjonowania, tracker laserowy, błąd systematyczny, kompensacja współrzędnych

1. Wstęp

Roboty przemysłowe są stosowane nie tylko w zadaniach transportowych i spawalniczych, lecz także w montażu, obróbce, wierceniu, kontroli jakości oraz procesach realizowanych na podstawie programowania offline. W takich zastosowaniach istotna jest zgodność rzeczywistego położenia punktu TCP z pozycją zadaną w zewnętrznym układzie odniesienia. Nawet przy dobrej jakości ruchu odchylenie rzędu kilku milimetrów może prowadzić do nieprawidłowego położenia narzędzia, kolizji z oprzyrządowaniem albo konieczności ręcznej korekty programu.

Dokładność i powtarzalność pozycjonowania opisują odmienne właściwości manipulatora. Dokładność określa zgodność średniej pozycji osiągananej przez robota z pozycją nominalną, natomiast powtarzalność opisuje rozrzut kolejnych najazdów na ten sam punkt. Robot może zatem wielokrotnie osiągać niewielki obszar, którego środek jest stale przesunięty względem wartości zadanej. Norma ISO 9283 porządkuje terminologię oraz

wskazuje procedury badania wybranych parametrów eksploatacyjnych robotów, w tym dokładności i powtarzalności pozycji [ISO, 1998].

Źródła błędów pozycjonowania obejmują niedokładności wymiarów członów, błędy położenia zerowych osi, tolerancje montażowe, luzy przekładni, podatność konstrukcji, ugięcie pod obciążeniem, wpływ temperatury i niepewność definicji układów BASE oraz TOOL. Przegląd metod kalibracji przedstawiony przez Li, Li i Luo [2021] wskazuje, że typowy proces obejmuje pomiar pozycji, identyfikację parametrów oraz kompensację. Metody modelowe mogą dawać wysoką dokładność, lecz wymagają znajomości struktury kinematycznej i dostępu do parametrów wykorzystywanych przez sterownik.

Laserowe trackery współrzędnościowe są często stosowane jako zewnętrzny układ odniesienia, ponieważ umożliwiają pomiar w dużej przestrzeni i z dokładnością wyższą od typowych błędów pozycjonowania robotów. Nubiola i Bonev [2013] wykorzystali tracker laserowy do kalibracji robota ABB IRB 1600, natomiast Nguyen, Zhou i Kang [2015] połączyli identyfikację modelową z siecią neuronową kompensującą składniki trudne do opisanego analitycznie. Jiang, Yu, Jia, Zhao i Xia [2020] również wykazali możliwość znacznego ograniczenia błędu bezwzględnego poprzez wykorzystanie zewnętrznych danych pomiarowych i modelu uczącego się.

Wymienione rozwiązania są skuteczne, lecz ich wdrożenie może być złożone w przypadku robota o zamkniętej architekturze lub ograniczonym dostępie do parametrów modelu. Alternatywę stanowią metody bezpośrednie, w których zmierzony błąd jest zapisywany w postaci tabeli korekt lub aproksymowany w funkcji położenia. Nie poprawiają one modelu robota w sensie fizycznym, lecz mogą ograniczyć błąd w obszarze, dla którego zebrano dane. Ich praktyczna wartość zależy od stabilności błędu, gęstości punktów oraz sposobu interpolacji pomiędzy punktami pomiarowymi.

W niniejszej pracy przyjęto prostsze podejście: zewnętrzny system pomiarowy służy do wyznaczenia średnich błędów ze znakiem w wybranych punktach, a korekcja jest realizowana przez zmianę współrzędnych zadawanych robotowi. Celem badań było określenie, czy błędy Astorino mają dostatecznie stabilny charakter, aby mogły stanowić podstawę lokalnej kompensacji, oraz wyznaczenie zestawu współrzędnych skorygowanych dla pięciu punktów pomiarowych. Zakres pracy obejmuje identyfikację błędów i przygotowanie danych korekcyjnych; eksperymentalne potwierdzenie poprawy dokładności przewidziano jako oddzielny etap walidacyjny.

2. Materiał i metody

Stanowisko badawcze

Badania przeprowadzono w Laboratorium Metrologii Współrzędnościowej Wydziału Mechanicznego Politechniki Krakowskiej, będącym częścią Laboratorium Ultraprecyzyjnych Pomiarów Współrzędnościowych. Stanowisko składało się z robota Astorino wersja B, układu obciążającego i pomiarowego zamocowanego na kołnierzu robota, trackera laserowego Leica LTD840 z bezprzewodową sondą T-Probe oraz komputera rejestrującego wyniki. Tracker ustawiono tak, aby zapewnić widoczność sondy podczas realizacji całej trajektorii.

Robot Astorino jest manipulatorem sześćoosiowym, którego sposób programowania i organizacja układów współrzędnych wprost odnosi się do robotów przemysłowych. Maksymalny udźwig robota wynosi 1 kg, zasięg 578 mm, a deklarowana powtarzalność pozycjonowania $\pm 0,1$ mm [ASTOR, 2025]. W badaniu zastosowano obciążenie odpowiadające 100% udźwigu nominalnego. Robot pracował w standardowej konfiguracji bez osi zewnętrznych, a ruchy pomiędzy punktami realizowano poleceniem LMOVE z prędkością 75 mm/s.

Konstrukcja badanego robota różni się od klasycznych manipulatorów przemysłowych między innymi zastosowaniem elementów wytwarzanych przyrostowo i napędów dostosowanych do platformy edukacyjnej. Z tego względu celem pracy nie było przeniesienie wyników na całą klasę robotów, lecz sprawdzenie metodyki, która może być następnie rozwijana na innych urządzeniach. Istotną cechą stanowiska jest możliwość programowej zmiany współrzędnych bez ingerencji w warstwę sterowania osiami, co odpowiada założeniom lokalnej kompensacji.

Rzeczywiste położenie końcówki określano za pomocą Leica Laser Tracker LTD840. System wyznacza współrzędne przestrzenne na podstawie pomiaru odległości oraz dwóch kątów. Sonda T-Probe umożliwia pomiar punktów, dla których bezpośrednio ustawienie reflektora sferycznego byłoby utrudnione. Według danych wykorzystanych w planie badań graniczny błąd przestrzenny systemu można opisać zależnością $0,02 + 0,01 \cdot L/1000$ mm, gdzie L jest długością pomiarową w milimetrach. Z uwagi na poziom tej wartości odchylenia standardowe przedstawione w dalszej części należy interpretować jako charakterystykę połączonego układu robot-pomiar, a nie wyłącznie samego manipulatora.

Do badań przyjęto pięć punktów obejmujących centralną część analizowanego obszaru i cztery położenia graniczne. Punkty dobrano na podstawie układu stosowanego w procedurach oceny pozycji według ISO 9283. Ich rozmieszczenie wymuszało różne konfiguracje osi, dzięki czemu możliwe było sprawdzenie, czy błąd ma charakter jednorodnego przesunięcia, czy zmienia się wraz z położeniem manipulatora.

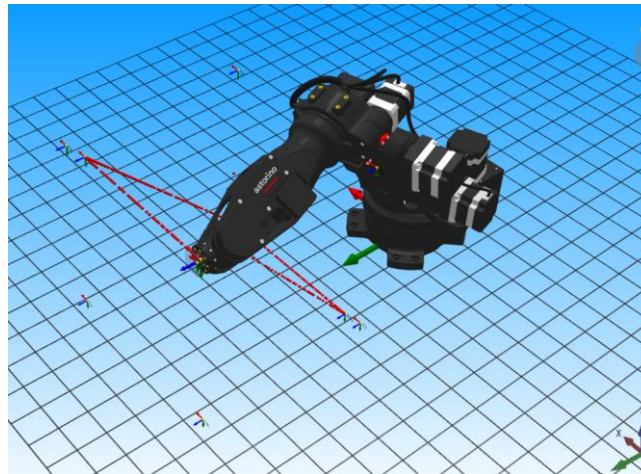
Badanie nie stanowiło pełnego testu zgodności z normą, ponieważ analizowano jedynie składowe translacyjne w jednym wariantcie prędkości, obciążenia i orientacji narzędzia. Nie oceniano dokładności orientacji ani dokładności ścieżki. Warunki te dobrano celowo, aby ograniczyć liczbę zmiennych i skoncentrować analizę na stabilności błędów pozycji. Wyniki należy więc odnosić do konkretnej konfiguracji stanowiska, a nie traktować jako uniwersalnej charakterystyki robota w całej przestrzeni roboczej.



Rysunek 1. Stanowisko badawcze z robotem Astorino i trackerem Leica LTD840

Tabela 1. Nominalne współrzędne punktów pomiarowych

Punkt	X [mm]	Y [mm]	Z [mm]
P1	-132,68	267,32	67,32
P2	132,68	267,32	67,32
P3	132,68	532,68	332,68
P4	-132,68	532,68	332,68
P5	0,00	400,00	200,00



Rysunek 2. Rozmieszczenie punktów i przebieg trajektorii w modelu robota

Procedura pomiarowa

Robot realizował cykliczną trajektorię P1–P2–P3–P4–P5. Po osiągnięciu każdego punktu oczekiwano 10 s w celu ograniczenia wpływu drgań, przeregulowania i krótkotrwałych odkształceń dynamicznych. Następnie rejestrowano współrzędne X, Y i Z. Dla każdego punktu wykonano 30 najazdów, co dało łącznie 150 zmierzonych pozycji.

W całej serii zachowano tę samą kolejność punktów, prędkość, obciążenie, orientację końcówki i nastawy sterownika.

Dane nominalne i pomiarowe porównano w uzgodnionym układzie współrzędnych używanym podczas eksperymentu. Dla punktu i oraz powtórzenia j błąd współrzędnej q zdefiniowano jako różnicę pomiędzy wartością zmierzoną i nominalną. Zachowanie znaku błędu jest konieczne, ponieważ korekta musi uwzględniać nie tylko jego wartość, ale również kierunek.

Stała kolejność przejazdu i jednakowy sposób dojazdu ograniczały wpływ zmiany kierunku obrotu osi oraz histerezy układu napędowego. Z punktu widzenia identyfikacji korekty jest to korzystne, ponieważ zmniejsza zmienność warunków, lecz jednocześnie oznacza, że wyznaczone wartości nie opisują zachowania robota przy dojeździe z dowolnego kierunku. W zastosowaniu przemysłowym trajektoria kalibracyjna powinna możliwie wiernie odpowiadać trajektorii wykonywanej podczas procesu.

W analizie głównej wykorzystano średnią i odchylenie standardowe. Niepewności typu A nie przedstawiono jako oddzielnego wyniku, ponieważ wartość $s/\sqrt{n}$ opisuje niepewność oszacowania średniej, a nie rozrzut pojedynczego pozycjonowania. Pełna niepewność pomiaru wymagałaby dodatkowo uwzględnienia trackera, sondy, transformacji układów, wyznaczenia TCP i wpływu środowiska. Z tego względu wnioski ograniczono do porównania wielkości przesunięcia średniego i obserwowanego rozrzutu.

Tabela 2. Parametry eksperymentu

Parametr	Wartość
Liczba punktów	5
Liczba powtórzeń na punkt	30
Łączna liczba pomiarów	150
Prędkość ruchu	75 mm/s
Obciążenie	1 kg
Czas stabilizacji	10 s
Rodzaj ruchu	LMOVE

Metoda analizy danych

Dla każdej osi przyjęto następującą definicję błędu:

$$\Delta q_{ij} = q_{m,ij} - q_{n,i} \quad (1)$$

gdzie q oznacza współrzędną X, Y lub Z, indeks i numer punktu, a indeks j numer powtórzenia. Średni błąd ze znakiem obliczono jako:

$$\Delta \bar{q}_i = (1/n) \cdot \sum_{j=1}^n \Delta q_{ij} \quad (2)$$

Precyzję kolejnych najazdów oceniono za pomocą odchylenia standardowego próbki:

$$s(q)_i = \sqrt{[\sum_{j=1}^n (\Delta q_{ij} - \Delta \bar{q}_i)^2 / (n-1)]} \quad (3)$$

Dodatkowo obliczono moduł średniego błędu przestrzennego:

$$E_i = \sqrt{(\Delta \bar{X}_i)^2 + (\Delta \bar{Y}_i)^2 + (\Delta \bar{Z}_i)^2} \quad (4)$$

Dla błędu zdefiniowanego zgodnie z równaniem (1) skorygowaną pozycję zadaną wyznaczono przez odjęcie średniego wektora błędu:

$$p_{corr,i} = p_{n,i} - \Delta \bar{p}_i \quad (5)$$

3. Wyniki i dyskusja

Błędy średnie i precyzja pozycjonowania

Wyniki wskazują na wyraźną różnicę pomiędzy przesunięciem średniej pozycji a rozrzutem kolejnych najazdów. Największy błąd składowy wystąpił w punkcie P3 i wyniósł -5,3576 mm w osi X. W punkcie P4 uzyskano również znaczne przesunięcie w osi X, równe -3,5188 mm. Dla P1 dominował błąd osi Z wynoszący +2,9919 mm, a błąd osi Y osiągnął +2,0444 mm. Najmniejsze przesunięcie przestrzenne wystąpiło w punkcie centralnym P5.

Wartości odchyłeń standardowych mieściły się w zakresie od 0,0082 do 0,0348 mm. Maksymalną wartość odnotowano dla współrzędnej Z w punkcie P5. W każdym przypadku rozrzut był wielokrotnie mniejszy od największych przesunięć średnich. Dla przykładu w punkcie P3 średni błąd osi X był równy -5,3576 mm, natomiast odchylenie standardowe tej samej współrzędnej wynosiło 0,0312 mm. Robot osiągał zatem zwarty obszar, lecz jego środek znajdował się ponad 5 mm od współrzędnej nominalnej.

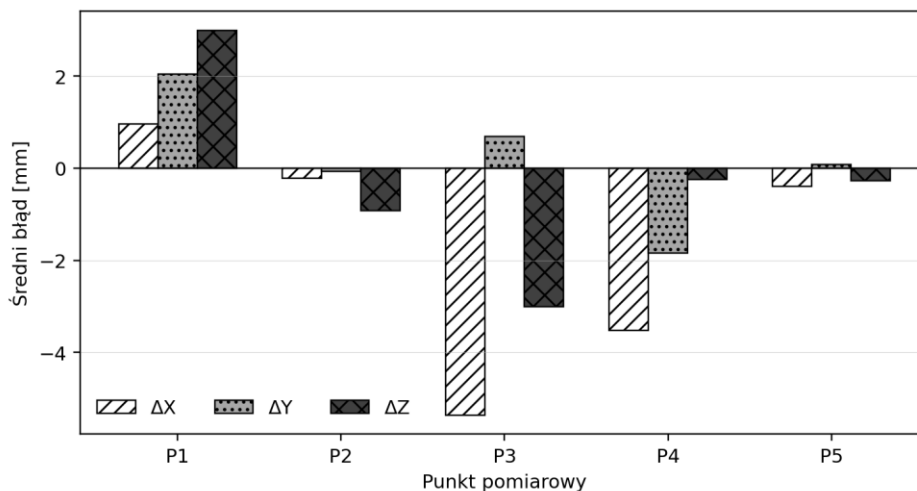
Małe wartości odchylenia standardowego nie powinny być utożsamiane z dokładnością systemu pomiarowego ani z pełną powtarzalnością pozycji według ISO 9283. W niniejszej analizie są one prostą miarą rozrzutu składowych X, Y i Z. Część obserwowanej zmienności może pochodzić z trackera, sondy, mocowania końcówki oraz warunków środowiskowych. Jednocześnie różnica rzędu kilku milimetrów pomiędzy błędem średnim a rozrzutem rzędu setnych milimetra jest na tyle duża, że uzasadnia traktowanie przesunięcia średniego jako dominującego składnika wymagającego korekcji.

W celu syntetycznego porównania punktów obliczono moduł wektora średniego błędu przestrzennego. Wartości wyniosły odpowiednio 3,749 mm dla P1, 0,949 mm dla P2, 6,182 mm dla P3, 3,980 mm dla P4 i 0,480 mm dla P5. Największa wartość była około 12,9 razy większa od najmniejszej, co potwierdza silną zależność błędu od położenia i konfiguracji robota. Średni moduł błędu dla wszystkich pięciu punktów wyniósł 3,068 mm.

Tabela 3. Średnie błędy ze znakiem, odchylenia standardowe i moduł błędu przestrzennego

Punkt	Średni błąd [mm]			Odchylenie standardowe [mm]			E [mm]
	$\Delta \bar{X}$	$\Delta \bar{Y}$	$\Delta \bar{Z}$	sX	sY	sZ	
P1	0,9626	2,0444	2,9919	0,0088	0,0096	0,0229	3,749
P2	-0,2196	-0,0635	-0,9209	0,0169	0,0089	0,0242	0,949
P3	-5,3576	0,6826	-3,0071	0,0312	0,0082	0,0147	6,182
P4	-3,5188	-1,8429	-0,2509	0,0297	0,0132	0,0124	3,980

P5	-0,3883	0,0838	-0,2689	0,0097	0,0097	0,0348	0,480
----	---------	--------	---------	--------	--------	--------	-------



Rysunek 3. Średnie błędy współrzędnych X, Y i Z w badanych punktach

Wyznaczenie lokalnych korekt

Zmieniały się nie tylko wartości, ale również znaki składowych. Błąd osi X był dodatni w P1 i ujemny w pozostałych punktach. Błąd osi Z przyjmował wartość dodatnią jedynie w P1. Oznacza to, że zastosowanie jednego globalnego przesunięcia dla całego obszaru nie byłoby uzasadnione. Korekcja skuteczna w jednym punkcie mogłaby zwiększać błąd w innym położeniu. Wynik ten wspiera zastosowanie korekt lokalnych lub modelu interpolacyjnego, podobnie jak w metodach łączących kalibrację i przestrzenną aproksymację błędów [Qi, Chen i Zhang, 2021].

Na podstawie średnich błędów utworzono eksperymentalną macierz korekcji, w której każdemu punktowi nominalnemu przypisano trójskładnikowy wektor błędu. Ponieważ błąd zdefiniowano jako wartość zmierzoną minus nominalna, współrzędne skorygowane otrzymano przez odjęcie wektora błędu od pozycji zadanej. Obliczone pozycje przedstawiono w tabeli 4. Stanowią one wartości wejściowe do kolejnej serii eksperymentalnej, a nie dowód skuteczności kompensacji.

Eksperymentalna macierz błędów przyjęła postać:

$$C = \begin{bmatrix} 0,9626 & 2,0444 & 2,9919 \\ -0,2196 & -0,0635 & -0,9209 \\ -5,3576 & 0,6826 & -3,0071 \\ -3,5188 & -1,8429 & -0,2509 \\ -0,3883 & 0,0838 & -0,2689 \end{bmatrix} \text{ mm}$$

Tabela 4. Współrzędne nominalne i obliczone współrzędne skorygowane

Punkt	Współrzędne nominalne [mm]			Współrzędne skorygowane [mm]		
	Xn	Yn	Zn	Xcorr	Ycorr	Zcorr
P1	-132,68	267,32	67,32	-133,6426	265,2756	64,3281
P2	132,68	267,32	67,32	132,8996	267,3835	68,2409
P3	132,68	532,68	332,68	138,0376	531,9974	335,6871
P4	-132,68	532,68	332,68	-129,1612	534,5229	332,9309
P5	0,00	400,00	200,00	0,3883	399,9162	200,2689

Ograniczenia i dalsza walidacja

Zaletą podejścia jest brak konieczności modyfikacji parametrów Denavita–Hartenberga, identyfikacji położenia zerowych osi lub dostępu do wewnętrznego modelu sterownika. Metoda może zostać zaimplementowana na poziomie programu robota lub systemu nadrzędnego, który przed wysłaniem celu dodaje właściwą korektę. W porównaniu z rozbudowanymi metodami modelowymi jest łatwiejsza do uruchomienia, ale wymaga bazy punktów reprezentującej rzeczywistą przestrzeń pracy.

Podstawowym ograniczeniem obecnych badań jest liczba punktów. Pięć pozycji pozwala wykazać występowanie przestrzennie zmiennych błędów, lecz nie umożliwia budowy wiarygodnej mapy całej przestrzeni roboczej. Kolejne ograniczenia to jedna wartość prędkości, jeden poziom obciążenia, stała orientacja narzędzia i jeden kierunek realizacji trajektorii. Zmiana obciążenia, temperatury, kierunku najazdu albo konfiguracji osi może zmienić zarówno wartość średnią, jak i rozrzut.

Analiza poszczególnych osi pokazuje, że największe średnie wartości bezwzględne występowały w osi X. Średnia z modułów błędów dla pięciu punktów wyniosła w tej osi około 2,09 mm, podczas gdy dla osi Y około 0,94 mm, a dla osi Z około 1,49 mm. Nie oznacza to, że oś X jest konstrukcyjnie najmniej dokładna w każdych warunkach; wynik może być związany z konfiguracjami wybranych punktów, orientacją narzędzia, definicją układów lub podatnością całego łańcucha pomiarowego. Rozstrzygnięcie źródła wymagałoby badań dla większej liczby konfiguracji i dodatkowych pomiarów parametrów geometrycznych.

Wyniki są zgodne z ogólnym obrazem przedstawianym w literaturze: robot może wykazywać dobrą powtarzalność przy wyraźnie gorszej dokładności bezwzględnej, a błąd zmienia się w przestrzeni roboczej [Li i in., 2021; Nubiola i Bonev, 2013]. Nie należy jednak bezpośrednio porównywać wartości liczbowych pomiędzy różnymi publikacjami, ponieważ zależą one od klasy robota, zasięgu, obciążenia, orientacji, prędkości, stanu cieplnego i zastosowanej aparatury. Celem niniejszego eksperymentu było wyznaczenie korekt dla

konkretnego stanowiska, a nie ocena Astorino względem robotów przemysłowych o innej konstrukcji.

Praktyczna implementacja może przyjąć formę tablicy, w której dla każdego punktu roboczego zapisane są współrzędne nominalne i odpowiadający im wektor korekty. System nadrzędny wyszukuje punkt najbliższy pozycji zadanej lub wyznacza korektę interpolowaną, a następnie przesyła do sterownika zmodyfikowane współrzędne. Dla powtarzalnego procesu z niewielką liczbą punktów wystarczająca może być tabela dyskretna. Dla pracy w większej objętości potrzebna jest gęstsza siatka oraz interpolacja, przy czym część punktów powinna pozostać niewykorzystana podczas budowy modelu i służyć wyłącznie do niezależnej walidacji.

Nie wykonano jeszcze niezależnej serii pomiarowej po wprowadzeniu współrzędnych skorygowanych. Z tego względu nie należy formułować wniosku o uzyskanej redukcji błędu. Wyniki potwierdzają natomiast, że błędy średnie są duże w stosunku do obserwowanego rozrzutu i mogą być wykorzystane jako dane wejściowe do walidacji kompensacji. W następnym etapie każdy punkt powinien zostać ponownie osiągnięty co najmniej 30 razy po zastosowaniu korekty, a skuteczność należy określić na podstawie błędu resztkowego, procentowej redukcji modułu błędu oraz sprawdzenia, czy korekcja nie pogarsza rozrzutu.

Walidacja powinna zostać wykonana w tych samych warunkach ruchu i środowiska, a następnie powtórzona dla punktów niewykorzystanych przy tworzeniu macierzy. Pierwszy test oceni poprawność znaku i wartości korekty w punktach uczących, natomiast drugi pokaże zdolność metody do uogólnienia. Dopiero zestawienie błędów przed i po korekcji pozwoli ocenić skuteczność proponowanego podejścia oraz porównać je z metodami modelowymi i interpolacyjnymi opisywanymi w literaturze.

4. Wnioski

1. W pięciu badanych punktach stwierdzono przestrzennie zmienne błędy pozycjonowania robota Astorino; największy błąd składowy wyniósł -5,3576 mm w osi X punktu P3.
2. Odchylenia standardowe współrzędnych nie przekroczyły 0,035 mm, dlatego rozrzut kolejnych najazdów był znacznie mniejszy od największych przesunięć średnich.
3. Moduł średniego błędu przestrzennego zmieniał się od 0,480 do 6,182 mm, co wyklucza zastosowanie jednego stałego przesunięcia dla całego badanego obszaru.
4. Na podstawie błędów ze znakiem wyznaczono pięciopunktową macierz korekcji oraz współrzędne skorygowane bez modyfikowania wewnętrznego modelu kinematycznego robota.
5. Opracowana macierz ma charakter lokalny i jej skuteczność musi zostać potwierdzona w niezależnej serii pomiarowej po kompensacji.
6. Dalsze badania powinny objąć większą liczbę punktów, punkty walidacyjne, interpolację korekt oraz ocenę wpływu prędkości, obciążenia, temperatury i kierunku najazdu.

Bibliografia:

1. ASTOR (2025). ASTORINO Operation Manual, B-version. Kraków: ASTOR.
2. ISO (1998). ISO 9283:1998 Manipulating industrial robots - Performance criteria and related test methods. Geneva: International Organization for Standardization.

3. Jiang Y., Yu L., Jia H., Zhao H., Xia H. (2020). Absolute Positioning Accuracy Improvement in an Industrial Robot. *Sensors*, 20(16), 4354. DOI: 10.3390/s20164354.
4. Li Z., Li S., Luo X. (2021). An Overview of Calibration Technology of Industrial Robots. *IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica*, 8(1), s. 23-36. DOI: 10.1109/JAS.2020.1003381.
5. Nguyen H.-N., Zhou J., Kang H.-J. (2015). A Calibration Method for Enhancing Robot Accuracy through Integration of an Extended Kalman Filter Algorithm and an Artificial Neural Network. *Neurocomputing*, 151, s. 996-1005. DOI: 10.1016/j.neucom.2014.03.085.
6. Nubiola A., Bonev I.A. (2013). Absolute Calibration of an ABB IRB 1600 Robot Using a Laser Tracker. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 29(1), s. 236-245. DOI: 10.1016/j.rcim.2012.06.004.
7. Qi J., Chen B., Zhang D. (2021). A Calibration Method for Enhancing Robot Accuracy Through Integration of Kinematic Model and Spatial Interpolation Algorithm. *Journal of Mechanisms and Robotics*, 13(6), 061013. DOI: 10.1115/1.4051061.

2. EWOLUCJA PRZEKSZTAŁTNIKÓW ENERGO-ELEKTRONICZNYCH – OD PROSTOWNIKÓW 6-PULSOWYCH DO UKŁADÓW WIELOPOZIOMOWYCH

Juliusz Kubiak, Karol Leśniewski

Uniwersytet Morski w Gdyni

Wydział Elektryczny

Studenckie Koło Naukowe Human Machine Interface

ul. Morska 81-87, 81 - 225 Gdynia

Email: juliusz@kubiak.fai.th, lesniewskikarol15@gmail.com

1. Wstęp

Celem niniejszego artykułu jest systematyzacja wybranych systemów przekształtnikowych, czyli układów transformacji energii elektrycznej, z uwzględnieniem ich charakterystycznych cech, funkcjonalności oraz kierunków dalszego rozwoju. Przedstawiono ewolucję układów w perspektywie historycznej – od prostego (choć niezmiernie ważnego) mostka Graetza, przez rozwiązania wielopulsowe, aż po współczesne przekształtniki wielopoziomowe. Ujęcie takie pozwala prześledzić, w jaki sposób ograniczenia poprzednich iteracji układów determinowały rozwój nowych topologii oraz metod sterowania.

W artykule zwrócono uwagę na zależność pomiędzy rozwojem topologii przekształtników, a wymaganiami stawianymi współczesnym systemom elektroenergetycznym. Analizie poddano przede wszystkim zdolność poszczególnych rozwiązań do ograniczania wyższych harmonicznych oraz zwiększania sprawności. Omówiono również ograniczenia konstrukcyjne i eksploatacyjne poszczególnych topologii, które stanowiły bezpośrednią motywację do opracowywania kolejnych rozwiązań.

Istotnym elementem analizy jest również wprowadzenie kontekstu przekształtników modularnych oraz rozwój materiałów półprzewodnikowych o szerokiej lub ultraszerokiej przerwie energetycznej. Materiały te umożliwiają zwiększenie częstotliwości przełączania, z równoczesną redukcją strat kluczowania, a także zwiększenie gęstości mocy. Z tego względu przedstawiona w artykule ewolucja nie ogranicza się wyłącznie do zmian topologicznych, ale obejmuje także rozwój elementów półprzewodnikowych.

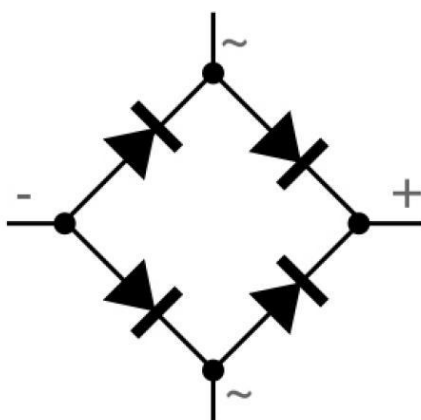
Gwałtowny rozwój współczesnej elektroenergetyki oraz rosnące zapotrzebowanie na energię elektryczną na przestrzeni minionego półwiecza – a zwłaszcza ostatnich lat – wymusiły dynamiczny rozwój systemów przekształtnikowych. Układy te stanowią kluczowy element zapewniający efektywne oraz elastyczne zarządzanie przepływem mocy w nowoczesnych sieciach transmisyjnych i dystrybucyjnych ^[12]. Jednym z najważniejszych czynników, który zapoczątkował ten proces, było wynalezienie tranzystora w 1947 roku. Stało się ono kamieniem milowym dla raczkującej wówczas energoelektroniki, zdominowanej dotychczas przez lampy elektronowe. Globalny postęp w technologii elementów półprzewodnikowych pozwala na sukcesywne zmniejszanie gabarytów układów

zdolnych do wysokosprawnego przetwarzania i sterowania parametrami energii elektrycznej, przy równoczesnej minimalizacji strat łączeniowych.

Intensyfikacja badań w tym obszarze wynika z potrzeby przesyłania energii na znaczne odległości i konieczności zasilania zróżnicowanych odbiorników, charakteryzujących się w większości nieliniowym oraz reaktancyjnym charakterem. Obecnie systemy energoelektroniczne stają przed nowymi wyzwaniami, związanymi bezpośrednio z transformacją energetyczną państw Unii Europejskiej. Wymaga ona masowej integracji odnawialnych źródeł energii (OZE) z siecią elektroenergetyczną przy jednoczesnym zachowaniu rygorystycznych norm dotyczących parametrów jakości energii. W tym kontekście kluczowym zagadnieniem pozostaje ciągłe doskonalenie topologii przekształtników, co czyni rozwój tej dziedziny niezwykle dynamicznym obszarem badawczym.

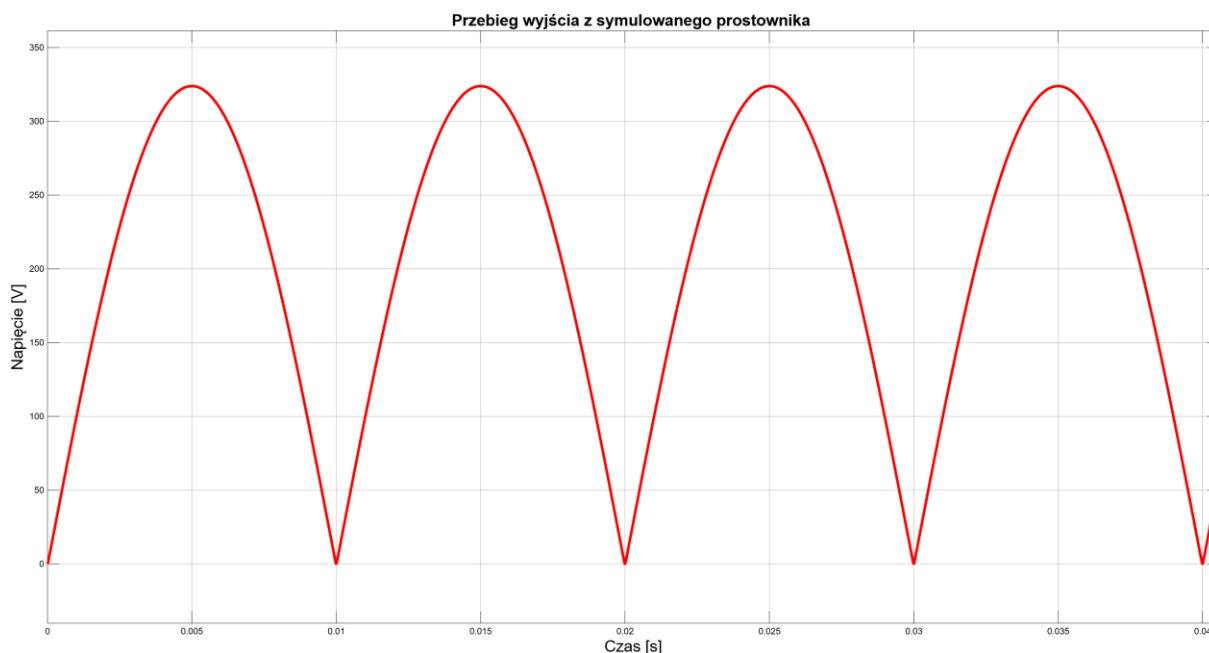
2. Podstawowe topologie klasyczne oraz ich ograniczenia

Jednym z fundamentalnych i najczęściej stosowanych układów prostowniczych w historii elektrotechniki jest jednofazowy mostek dwupołówkowy, powszechnie nazywany mostkiem Graetza. Swoją nazwę zawdzięcza on niemieckiemu fizykowi Leo Graetzowi, choć niezależnie topologia została już wcześniej opracowana i opatentowana przez polskiego wynalazcę Karola Pollaka^[13]. W klasycznej wersji niesterowanej układ składa się z czterech diod półprzewodnikowych połączonych w strukturę mostkową^[2] (Rys. 1).



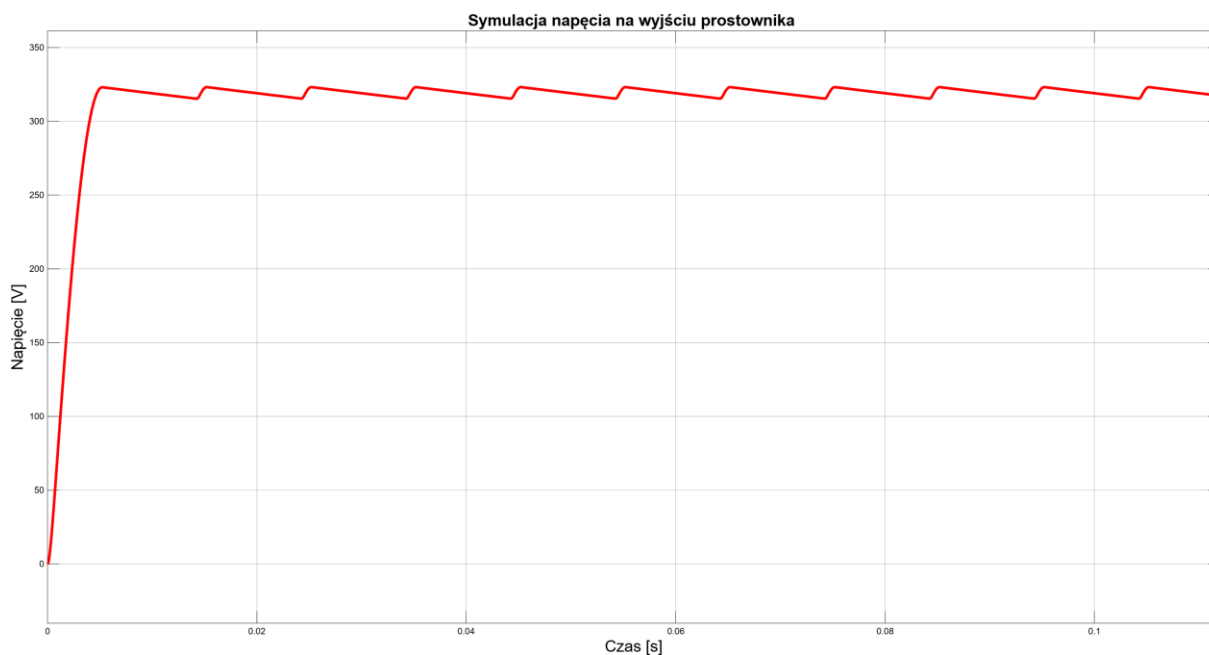
Rysunek 1. Schemat ideowy mostka Graetza ^[16]

Głównym zadaniem topologii jest konwersja napięcia przemiennego (AC) na napięcie stałe (DC). Mostek Graetza jest układem dwupulsowym dwupołówkowym, co oznacza, że na jeden okres napięcia wejściowego przypadają dwa pulsy napięcia wyjściowego, a ujemny półokres sinusoidy zostaje odwrócony, tworząc przebieg tętniący (Rys. 2).



Rysunek 2. Przebieg napięcia wyjściowego nieobciążonego mostka Graetza [5]

Napięcie uzyskane bezpośrednio na wyjściu takiego prostownika charakteryzuje się bardzo wysokim współczynnikiem tętnień, co uniemożliwia bezpośrednie zasilanie większości czułych układów elektronicznych. W celu wygładzenia przebiegu stosuje się filtry pojemnościowe (kondensator podłączony równolegle do obciążenia) lub indukcyjne (dławik szeregowo z obciążeniem). Zastosowanie filtra pojemnościowego pozwala na podtrzymanie wartości napięcia w momentach opadania fali napięcia sieciowego, co znacząco zmniejsza amplitudę tętnień i wygładza przebieg wyjściowy układu (Rys. 3).



Rysunek 3. Przebieg napięcia wyjściowego mostka Graetza z filtrem pojemnościowym [5]

Wprowadzenie filtrów poprawia kształt napięcia wyjściowego, jednak niesie za sobą istotne konsekwencje dla sieci zasilającej. Prostowniki z filtrem pojemnościowym pobierają z sieci prąd w sposób impulsowy – tylko w bardzo krótkich momentach ładowania kondensatora, gdy chwilowa wartość napięcia zasilającego przewyższa napięcie na kondensatorze. Takie rozwiązanie drastycznie zwiększa odkształcenie pobieranego prądu poprzez generację wyższych harmonicznych, co negatywnie wpływa na jakość energii w sieci elektroenergetycznej.

Miarą odkształcenia sygnału od idealnej sinusoidy jest współczynnik zawartości harmonicznych (ang. THD – Total Harmonic Distortion), będący stosunkiem wartości skutecznych wyższych harmonicznych do składowej podstawowej ^[14]. Wysokie wartości THD prądu powodują szereg negatywnych zjawisk z punktu widzenia sieci elektroenergetycznej, do których należą m.in. wzrost strat mocy (głównie w rdzeniach transformatorów), powstawanie prądów pasożytniczych, przyspieszone zużycie izolacji, a także ryzyko wystąpienia rezonansów napięć i prądów w sieci.

3. Przekształtniki wielopulsowe jako metoda redukcji wyższych harmonicznych

Jak wykazano w poprzednim rozdziale, stosowanie klasycznych prostowników dwupulsowych z filtrami wyjściowymi drastycznie pogarsza jakość prądu w sieci elektroenergetycznej. Problem ten staje się jeszcze bardziej wyrazisty w sieciach trójfazowych przy zastosowaniu standardowych prostowników sześciopulsowych. Taki układ wprowadza do sieci harmoniczne prądu o rzędach h opisanych zależnością 3.1:

$$h = 6k \pm 1 \text{ dla } k = 1, 2, 3 \dots \quad (3.1)$$

W praktyce oznacza to silną obecność harmonicznych 5., 7., 11. czy 13. rzędu, które wywołują straty mocy i zakłócenia w sieci. Ponieważ klasyczne, pasywne filtry LC są masywne, drogie i działają selektywnie tylko na wybrane zakresy częstotliwości, inżynieria energoelektroniczna wypracowała inne rozwiązanie – struktury wielopulsowe (12-, 18- czy 24-pulsowe).

Układy takie, zamiast filtrowania wygenerowanych już zniekształceń – eliminują harmoniczne bezpośrednio u źródła dzięki odpowiednim przesunięciom fazowym napięć zasilających. Efekt ten uzyskuje się poprzez łączenie kilku mostków 6-pulsowych za pomocą specjalnych transformatorów wielouzwojeniowych.

Układy 12-pulsowe korzystają z transformatorów o dwóch uzwojeniach wtórnych, które przesuwają fazę o 30° i pozwalają na wzajemną kompensację najbardziej inwazyjnych harmonicznych (5. i 7.) po stronie pierwotnej. Układy 18- czy 24-pulsowe dodają odpowiednio jedno lub dwa uzwojenia wtórne w relacji do układu 12-pulsowego, co pozwala uzyskać przesunięcia fazowe równe 20° lub 15° .

Dla ogólnego przypadku układu m -pulsowego generowane harmoniczne h opisuje wzór 3.2:

$$h = mk \pm 1 \text{ dla } k = 1, 2, 3 \dots \quad (3.2)$$

Przy idealnych warunkach wyższe składowe harmoniczne znoszą się wzajemnie, dzięki czemu współczynnik THD prądu spada z kilkudziesięciu procent do zaledwie kilku (a w układach 24-pulsowych nawet poniżej 2%) bez stosowania filtrów.

Mimo znakomitych właściwości filtrujących, układy te niosą za sobą poważne wyzwania sprzętowe. W klasycznych wersjach dużych mocy, opartych na tradycyjnych tyrystorach, głównym problemem jest brak możliwości swobodnego wyłączania elementu – zaprzestanie przewodzenia następuje dopiero przy spadku prądu głównego do bardzo małej, praktycznie zerowej wartości podtrzymania. Aby rozwiązać ten problem, w nowoczesnych implementacjach zamiast tyrystorów stosuje się tranzystory bipolarne z izolowaną bramką (IGBT), które pozwalają na przejęcie pełnej kontroli nad momentem załączania i wyłączania klucza. Tranzystory eliminują również kolejne ograniczenie klasycznych tyrystorów, jakim są relatywnie długie czasy przełączania.

Niezależnie jednak od zastosowanego elementu, szybkim zmianom stanów załączenia towarzyszy zjawisko gwałtownego narastania lub opadania prądu w czasie, co przy niemożliwej do wyeliminowania obecności indukcyjności rozproszenia uzwojeń transformatora generuje niebezpieczne przepięcia komutacyjne i krótkotrwałe szpilki napięcia, które destrukcyjnie wpływają na izolację maszyn i urządzeń elektrycznych.

Dodatkowo, praca prostowników wielopulsowych jest ściśle uzależniona od symetrii napięcia zasilającego oraz idealnego dopasowania parametrów transformatorów. W warunkach rzeczywistych sieci, gdzie często występuje asymetria fazowa, mechanizm wzajemnego znoszenia się harmonicznych traci na skuteczności. Prowadzi to do pojawienia się asymetrycznych prądów wyjściowych, których obecność wprowadza składową stałą podmagnesowującą transformator. Rdzeń zaczyna wchodzić w stan nasycenia, co z kolei powoduje dalszy wzrost asymetrii prądów, pogłębiając tym samym podmagnesowywanie rdzenia. Skutkuje to lawinowym nasycaniem się rdzenia magnetycznego, wzrostem strat w żelazie oraz generowaniem dodatkowych harmonicznych niecharakterystycznych.

4. Rewolucja: przejście na przekształtniki wielopoziomowe (MLC – Multilevel Converters)

Ograniczenia gabarytowe, wysokie koszty transformatorów przesuwających fazę oraz ich ograniczona elastyczność topologiczna wymusiły poszukiwanie rozwiązań, które pozwoliłyby na redukcję harmonicznych bezpośrednio w procesie kluczowania napięcia, bez stosowania ciężkich elementów magnetycznych. Odpowiedzią na te wyzwania stały się przekształtniki wielopoziomowe (ang. Multilevel Converters – MLC), będące strukturami modułarnymi, składającymi się z wielu stopni przełączających.

Idea działania układów MLC polega na syntezie schodkowego przebiegu napięcia wyjściowego, zbliżonego kształtem do sinusoidalnego, z wielu mniejszych, niezależnych od siebie poziomów napięcia stałego (DC). W przeciwieństwie do klasycznych układów dwupoziomowych, gdzie klucze półprzewodnikowe (wspomniane wcześniej tyrystory czy tranzystory IGBT) są przełączane pomiędzy pełnym dodatnim a ujemnym potencjałem szyny DC – w strukturach wielopoziomowych napięcie na zablokowanym kluczu jest tylko ułamkiem całkowitego napięcia zasilania. Pozwala to na stosowanie elementów o niższym napięciu znamionowym w aplikacjach średniego lub wysokiego napięcia, a także na zmniejszenie częstotliwości przełączania, co przekłada się na redukcję strat kluczowania.

W praktyce przemysłowej realizacja tej idei opiera się na trzech klasycznych topologiach, z których każda wiąże się ze specyficznymi wyzwaniami konstrukcyjnymi i aplikacyjnymi:

NPC (ang. Neutral-Point-Clamped) – topologia z diodami poziomującymi (klampującymi, ang. clamping – przypinanie/ograniczanie poziomu napięcia), które „przypinają” punkt wyjściowy do punktu neutralnego dzielonej szyny DC. Głównym problemem topologicznym jest drastyczny wzrost liczby komponentów wraz ze zwiększaniem liczby poziomów. Liczbę diod klampujących przypadających na jedną fazę N_D dla układu m -poziomowego określa zależność 4.1.

$$N_D = (m - 1) \cdot (m - 2) \quad (4.1)$$

Z powyższego wzoru wynika, że przejście z czterech na pięć poziomów napięcia podwaja potrzebną liczbę diod na fazę (6 diod na fazę dla 4 poziomów $\rightarrow$ 12 diod na fazę dla 5 poziomów). Dodatkowo układ ten cierpi na nierównomierne obciążenie kluczy wewnętrznych i zewnętrznych – co skutkuje niesymetrycznymi stratami w ramach całego układu. Dlatego też układy w topologii NPC wymagają skomplikowanego algorytmicznego sterowania w celu zrównoważenia napięć na kondensatorach szyny DC (ang. voltage balancing).

CHB (ang. Cascaded H-Bridge) – struktura kaskadowa, łącząca szeregowo identyczne jednofazowe mostki pełne. Modularność struktury ułatwia serwis i produkcję, a sterowanie impulsami o sinusoidalnie zmienianym współczynniku wypełnienia zapewnia naturalne równoważenie napięć. Podobnie jak w topologii NPC, wyzwaniem jest ogromna liczba autonomicznych komponentów półprzewodnikowych oraz konieczność zapewnienia galwanicznie odizolowanego źródła DC dla każdego pojedynczego modułu-mostka, co zmusza do stosowania ciężkich i skomplikowanych w budowie transformatorów wejściowych.

MMC (ang. Modular Multilevel Converter) – współczesny „złoty standard” w aplikacjach najwyższych napięć (HVDC). Składa się z setek połączonych szeregowo modułów jedno- lub półmostkowych z własnymi kondensatorami. Ceną za niemal idealną sinusoidę na wyjściu jest ekstremalna liczba komponentów – układ wymaga nie tylko setek tranzystorów, ale też dedykowanych dla nich sterowników bramkowych, układów izolacji oraz dziesiątek czujników. Kluczowym wyzwaniem sterowania jest ciągłe, programowe balansowanie energii na setkach niezależnych kondensatorów oraz programowe tłumienie pasożytniczych prądów cyrkulacyjnych między ramionami przekształtnika ^[4,7].

Przejście z technologii wielopulsowej (klasycznej tyrystorowej z lat 60. XX wieku) na technologię wielopoziomową (lata 80. XX wieku – pierwszy falownik NPC) oznaczało całkowitą zmianę paradygmatu – zamiast walczyć z harmonicznymi za pomocą ciężkich i topornych transformatorów, zaczęto precyzyjnie budować pożądany kształt fali sinusoidalnej ze sterowalnych półprzewodnikowych „cegiełek”. Sukces ten został jednak wypracowany kosztem znacznego skomplikowania układów sterowania, konieczności

ciągłego równoważenia napięć między poszczególnymi stopniami oraz utrudnionej diagnostyki elementów. Dlatego aktualne systemy cechują się dużą, choć niezbędną redundancją – pozwalającą na nieprzerwaną pracę nawet przy uszkodzeniu całego modułu [4, 7].

Technika wielopoziomowych przekształtników nadal jest daleka od osiągnięcia płaskowyzu rozwojowego, ponieważ ewolucję tej dziedziny napędza radykalnie postępująca rewolucja w obszarze materiałów półprzewodnikowych o szerokim paśmie wzbronionym (ang. Wide Bandgap – WBG). Tradycyjne krzemowe tranzystory IGBT ustępują miejsca nowoczesnym elementom wykonanym częściowo lub, jak to ma miejsce w przypadku najnowocześniejszych przyrządów, w całości z węgla krzemu (SiC) czy azotku galu (GaN) [1, 3, 9]. Fundamentalna przewaga materiałów WBG nad rozpowszechnionym krzemem (Si, przerwa energetyczna $E_g \sim 1.1$ eV) wynika z ich unikalnych właściwości fizycznych:

- Węgiel krzemu (SiC, $E_g \sim 3.26$ eV) charakteryzuje się przede wszystkim prawie dziesięciokrotnie większym krytycznym natężeniem pola elektrycznego w stosunku do krzemu ($E_c \sim 2.5\text{--}3$ MV/cm w porównaniu do 300 kV/cm dla krzemu), a także niemal trzykrotnie wyższą przewodnością cieplną niż krzem ($\lambda_{th} \sim 490$ W/m·K vs 150 W/m·K). Pozwala to na produkcję elementów o niskiej rezystancji włączenia, pracę przy wysokonapięciowych aplikacjach oraz wydajne odprowadzanie ciepła bez ryzyka ucieczki termicznej, czyli sytuacji, w której samonagrzewanie elementu podnosi poziom przewodzonego prądu, co prowadzi do dalszego nagrzewania, a końcowo do spalania elementu i uszkodzenia modułu [3].

- Azotek galu (GaN, $E_g \sim 3.4$ eV) jest wykorzystywany głównie w aplikacjach wymagających bardzo krótkich czasów przełączania ze względu na swoją unikalną budowę korzystającą ze ściśnięcia elektronów półprzewodnika, w sposób uniemożliwiający ich swobodne przemieszczanie się w trzech osiach. Osiąga się to przez połączenie warstwy azotku galu (GaN) z powierzchnią azotku glinowo-galowego (AlGaN), otrzymanego w ten sposób półprzewodnika nie trzeba już domieszkować. Efektywnie zabieg ten tworzy dwuwymiarową płaszczyznę przewodzenia (2DEG – Two-Dimensional Electron Gas), pozwalającą na ekstremalną mobilność elektronów, niespawalnianą domieszkami lub zanieczyszczeniami donorowymi. Drastycznie zmniejsza też to rezystancję włączenia kanału, a także częstotliwość przełączania elementu, która może sięgać nawet kilkudziesięciu megahercy. Niestety tranzystory na podłożu GaN-AlGaN stosowane są tylko w zastosowaniach niskiej i średniej mocy, takich jak, np. ładowarki do urządzeń mobilnych. Wynika to z mniejszych strat mocy i lepszej kultury pracy (temperatury mniejsze o 40-60%) oraz mniejszych gabarytów takich zasilaczy, które w porównaniu do krzemowych osiągają o wiele większe moce w ramach obudowy o takich samych gabarytach [1, 9].

W fazie intensywnych badań są także technologie półprzewodnikowe korzystające z materiałów o ultraszerokim paśmie wzbronionym (> 4 eV), takie jak tlenek galu o odmianie beta ($\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$), azotek glinu (AlN) czy nawet syntetyczny diament [10, 11]. Oferują one wielokrotnie większą przewodność cieplną (syntetyczny diament posiada jedną z największych wartości przewodności spośród aktualnie znanych materiałów) oraz wysokie wartości krytycznego natężenia pola elektrycznego [10, 11]. Istotnym kierunkiem rozwoju jest także integracja włókien światłowodowych stosowanych do przesyłania sygnałów sterujących do elementów wykonawczych – tranzystorów z dedykowanym submodułem zamieniającym

impuls świetlny w elektryczny ^[10, 11]. W rozwoju jest również technologia elementów wyzwalanych bezpośrednio światłem, czyli tyrystorów załączanych światłem LTT (ang. Light-Triggered Thyristors) ^[15], których złącze półprzewodnikowe jest zaprojektowane w sposób pozwalający na bezpośrednie załączanie elementu impulsem świetlnym. Silny impuls światła laserowego generuje ładunki bezpośrednio wewnątrz struktury półprzewodnika, co pozwala na całkowite wyeliminowanie klasycznych obwodów elektronicznych z bloku formowania impulsu bramkowego ^[15].

Rozwój tych technologii pozwala na wyższe temperatury pracy, mniejsze straty przewodzenia oraz możliwość pracy przy ekstremalnie wysokich częstotliwościach kluczenia, które umożliwiają stosowanie miniaturowych elementów pasywnych i upraszczają układy balansujące. Zastosowanie nowoczesnych modułów otwiera drogę do budowy systemów bardziej zwartych, o niespotykanych dotąd gęstościach mocy, redefiniując rolę przekształtnika w nowoczesnych sieciach typu Smart Grid oraz w systemach wielkoskalowej integracji OZE ^[1, 3, 9, 10, 11].

Tabela 1. Porównanie układów MLC z wielopulsowymi

Porównanie układów MLC z wielopulsowymi		
Układy	Wielopulsowe (12-, 18-, 24-pulsowe i wyższe)	Wielopoziomowe
Podstawa działania	Przesunięcie fazowe, znoszenie harmonicznych	Synteza fali z wielu poziomów napięcia
Główny element	Transformator wielouzwojeniowy	Sterowalne klucze półprzewodnikowe
Regulacja	Ograniczona (tyrystory) lub brak (diody prostownicze)	Pełna, wysokosprawna regulacja (zaawansowane sterowanie PWM)
THD	Niski, ale wrażliwy na asymetrię zasilania/obciążenia	Bardzo niski, determinowany algorytmem modulacji
Elastyczność	Niska (duże skomplikowane konstrukcyjne transformatory)	Wysoka (modularność, programowalność, możliwość pracy z uszkodzonym modułem)
Zastosowania	Głównie prostowniki dużej mocy	Prostowniki, falowniki, kompensatory, HVDC

Opracowanie własne na podstawie [6,8].

5. Wnioski

Ewolucja przekształtników sieciowych od prostego mostka Graetza, poprzez topologie wielopulsowe, aż po zaawansowane układy wielopoziomowe MMC pokazuje, że rozwój tej technologii był dynamiczny i skoncentrowany na sprostaniu rosnącym wymaganiom jakościowym oraz ilościowym stawianym energii elektrycznej, przy jednoczesnym zachowaniu wysokiej sprawności całego systemu. Każdy kolejny szczebel drabiny postępu rozwiązywał problemy swojego poprzednika, generując równocześnie nowe, bardziej złożone wyzwania konstrukcyjne i sygnałowe. Kamieniem milowym w tej dziedzinie była skuteczna

eliminacja harmonicznych wyższych rzędów za pomocą układów wielopulsowych. To właśnie ta technika znoszenia zakłóceń uświadomiła inżynierom i badaczom, że kluczem do sukcesu jest zmiana dotychczasowego podejścia do procesu kształtowania sygnału, co otworzyło drogę do rozwoju struktur wielopoziomowych.

Idea syntezy fali napięcia z mniejszych półprzewodnikowych „cegiełek” całkowicie odmieniła paradygmat filtrowania wyższych harmonicznych. Zamiast tłumić niepożądane składowe, sygnał wyjściowy jest formowany w sposób kontrolowany, tak aby od razu przyjął pożądany sinusoidalny kształt, bez potrzeby stosowania ciężkich, wielkogabarytowych elementów magnetycznych. Masywne transformatory przesuwające fazę zostały zastąpione kompaktowymi, sterowanymi modułami tranzystorowymi, pozwalającymi na obniżenie częstotliwości przełączania pojedynczych kluczy wraz ze wzrostem liczby poziomów, co bezpośrednio przekłada się na zmniejszenie strat przełączania. Jednocześnie, topologia wielopoziomowego formowania sygnału pozwoliła na zastosowanie elementów półprzewodnikowych o niższym napięciu znamionowym w aplikacjach średniego i wysokiego napięcia, ponieważ przełączają one tylko ułamek całkowitego potencjału szyny zasilającej DC.

Współczesna faza rozwoju techniki wielopoziomowej w pełni wykorzystuje potencjał modularności, oferując układy o wysokim stopniu elastyczności programowej, szybkiej regulacji oraz redundancji, pozwalającej na pracę układu w przypadku awarii pojedynczego modułu. Ewolucja jest dodatkowo napędzana nowymi osiągnięciami w dziedzinie materiałów półprzewodnikowych o szerokiej, lub w perspektywie nadchodzących lat, ultraszerokiej przerwie energetycznej. W efekcie nowoczesne przekształtniki przestały wyłącznie pełnić rolę prostych układów wykonawczych. Stanowią one obecnie inteligentne, wysokosprawne węzły sieciowe, determinujące stabilność systemów przesyłowych typu Smart Grid oraz umożliwiające bezproblemową, wielkoskalową integrację odnawialnych źródeł energii z istniejącym już systemem elektroenergetycznym.

Bibliografia:

1. Hodges, C. & Anaya, J. & Stoffels, Steve & Marcon, D. & Kuball, Martin. (2013). AlGaIn/GaN field effect transistors for power electronics—Effect of finite GaN layer thickness on thermal characteristics. *Applied Physics Letters*.
2. Jaeklin, André. (1992). *Power Semiconductor Devices and Circuits*.
3. Langpoklakpam, Catherine & Liu, An-Chen & Chu, Kuo-Hsiung & Hsu, Lung-Hsing & Lee, Wen-Chung & Chen, Shih-Chen & Sun, Chia-Wei & Shih, Min-Hsiung & Lee, Kung-Yen & Kuo, Hao-Chung. (2022). Review of Silicon Carbide Processing for Power MOSFET.
4. Lesnicar, A., & Marquardt, R. (2003). An Innovative Modular Multilevel Converter Topology Suitable for a Wide Power Range.
5. MathWorks. (2022). *Simscape Electrical™ Documentation: Multilevel Inverter Examples*.
6. Mohan, N., Undeland, T. M., & Robbins, W. P. (2003). *Power Electronics: Converters, Applications, and Design* (3rd ed.). John Wiley & Sons.
7. Nami, Alireza & Liang, Jiaqi & Dijkhuizen, Frans & Demetriades, Georgios. (2015). Modular Multilevel Converters for HVDC Applications: Review on Converter Cells and Functionalities. *IEEE Transactions on Power Electronics*.

8. Rashid, M. H. (2017). Power Electronics Handbook.
9. Zhang, Renping & Wei, Yan & Wang, Xiaoliang & Yang, Fuhua. (2011). Fabrication and characterization of high performance AlGa_N/Ga_N HEMTs on sapphire with silicon nitride passivation. Journal of Semiconductors.
10. Zhao, Feiyang & He, Yongjie & Huang, Bin & Zhang, Tianyi & Zhu, Hao. (2024). A Review of Diamond Materials and Applications in Power Semiconductor Devices. Materials.
11. Xu, Mingfei & Wang, Dawei & Fu, Kai & Herath Mudiyansele, Dinusha & Fu, Houqiang & Zhao, Yuji. (2022). A review of ultrawide bandgap materials: properties, synthesis and devices. Oxford Open Materials Science.

Wykaz stron internetowych:

12. <https://markel.pl/do-czego-sluza-przekształtniki-energoelektroniczne/>
13. https://pl.wikipedia.org/wiki/Mostek_Graetza
14. <https://circutor.com/pl/bez-kategorii/harmoniczne-pochodzenie-skutki-i-rozwiazania/>
15. <https://www.infineon.com/assets/row/public/documents/60/42/infineon-an2018-08-triggering-etts-applicationnote-en.pdf>
16. <https://iviter.pl/encyklopedia/mostek-graetza>

3. WPŁYW WIELOKROTNEGO RECYKLINGU KRUSZYWA BETONOWEGO NA KINETYKĘ HYDRATACJI I ROZWÓJ MIKROSTRUKTURY ZACZYNU CEMENTOWEGO - STAN BADAŃ I PERSPEKTYWY ROZWOJU

Krzysztof Liszka

Uniwersytet Przyrodniczy we Wrocławiu

Dyscyplina naukowa: inżynieria lądowa

E-mail: liszka.k@gmail.com

1. Wstęp

1.1. Kontekst środowiskowy i technologiczny

Beton jest podstawowym materiałem konstrukcyjnym współczesnego budownictwa, a jego powszechne stosowanie wiąże się z dużym zapotrzebowaniem na kruszywa mineralne oraz powstawaniem znacznych strumieni odpadów po zakończeniu użytkowania obiektów. Zastępowanie kruszywa naturalnego kruszywem odzyskanym z betonu rozbiórkowego może ograniczać eksploatację surowców pierwotnych i zmniejszać skalę składowania odpadów. Jednorazowe wykorzystanie kruszywa z recyklingu nie oznacza jednak pełnego zamknięcia obiegu materiałowego. Beton zawierający kruszywo wtórne po kolejnym okresie eksploatacji również powinien nadawać się do rozdrobnienia i ponownego zastosowania w nowym kompozycie cementowym [Kim, 2024; Salesa i in., 2022].

Wielokrotny recykling należy zatem rozumieć jako sekwencję następujących po sobie cykli: wytworzenia betonu, jego dojrzewania i użytkowania, rozkruszenia, odzyskania kruszywa oraz ponownego użycia tego materiału w kolejnej generacji betonu. Takie podejście różni się od typowego recyklingu jednokrotnego, ponieważ w każdym następnym cyklu kruszywo może zawierać nie tylko rdzeń mineralny i zaprawę z pierwotnego betonu, lecz także kolejne warstwy zaprawy powstałe w następnych generacjach. Badania betonu wielokrotnie recyklingowanego potwierdzają, że wraz z kolejnymi cyklami ewoluują zarówno właściwości odzyskanego kruszywa, jak i struktura kompozytu, choć kierunek i intensywność zmian zależą od sposobu projektowania mieszanek oraz jakości materiału macierzystego [Abreu, Evangelista i de Brito, 2018; Huda i Alam, 2014; Salesa i in., 2017].

1.2. Uzasadnienie problemu badawczego

Ziarno kruszywa betonowego ma budowę kompozytową. Obejmuje ono kruszywo pierwotne, przylegającą starą zaprawę cementową, istniejącą strefę przejściową oraz mikropęknięcia powstałe podczas eksploatacji i kruszenia. W kolejnych generacjach mogą pojawiać się następne warstwy zaprawy i kolejne granice kontaktowe. Zwiększa to niejednorodność materiału oraz utrudnia jednoznaczne oddzielenie wpływu samego numeru cyklu od wpływu zawartości starej zaprawy, jakości betonu macierzystego i technologii odzysku. Analizy mikrostrukturalne, w tym badania z użyciem mikrotomografii

rentgenowskiej, wskazują na istotną rolę rozmieszczenia starej zaprawy, porów i uszkodzeń we właściwościach kruszywa wielokrotnie przetwarzanego [Thomas, de Brito, Gil, Sainz-Aja i Cimentada, 2018; Thomas, de Brito, Cimentada i Sainz-Aja, 2020].

Narastający udział starej zaprawy prowadzi zazwyczaj do zwiększenia nasiąkliwości i porowatości kruszywa betonowego z recyklingu (RCA) oraz obniżenia jego gęstości. Zmiany te nie muszą jednak przebiegać liniowo, ponieważ zależą także od stopnia zastąpienia kruszywa naturalnego, wytrzymałości i składu poprzedniej generacji betonu, frakcji ziarnowej, intensywności kruszenia, sposobu usuwania frakcji drobnych oraz warunków wilgotnościowych [Abreu i in., 2018; Kim, Grabiec, Ubysz, Yang i Kim, 2023]. Z tego względu numer cyklu nie powinien być traktowany jako samodzielny wskaźnik jakości materiału. Bardziej miarodajne jest łączne rozpatrywanie historii kruszywa, udziału zaprawy przylegającej, parametrów porowych i rzeczywistego bilansu wody w mieszance.

Właściwości kruszywa z recyklingu mogą bezpośrednio modyfikować hydratację cementu. Suche, porowate ziarna pobierają część wody zarobowej, chwilowo zmniejszając jej dostępność dla nowego zaczynu i zmieniając lokalny stosunek woda-cement. Kruszywo wstępnie nasycone może natomiast stopniowo oddawać wodę i działać podobnie do materiału zapewniającego pielęgnację wewnętrzną. Jednocześnie chropowata powierzchnia oraz drobne cząstki starej zaprawy mogą stanowić miejsca zarodkowania produktów hydratacji. Wypadkowy wpływ na okres indukcji, intensywność wydzielania ciepła i stopień hydratacji zależy więc nie tylko od liczby cykli, ale również od stanu wilgotnościowego kruszywa, sposobu kompensacji jego absorpcji, udziału frakcji drobnej i składu spoiwa. Brak kontroli tych parametrów może prowadzić do pozornie sprzecznych wyników.

Konsekwencje procesów zachodzących we wczesnym okresie dojrzewania ujawniają się w strukturze porowej nowego zaczynu oraz w strefach przejściowych. W betonie wielokrotnie recyklingowanym występuje układ obejmujący granicę kruszywo pierwotne-stara zaprawa, granicę stara zaprawa-nowy zaczyn oraz, w dalszych generacjach, kolejne odziedziczone warstwy i strefy kontaktowe. Ich porowatość, ciągłość mikropęknięć i lokalny skład fazowy mogą decydować o transporcie wilgoci i substancji agresywnych. Dotychczasowe prace wykazały wpływ wielokrotnego recyklingu na wytrzymałość, odkształcalność, skurcz i trwałość betonu [Salesa i in., 2017; Silva, Evangelista i de Brito, 2021]. Właściwości te są jednak skutkiem złożonych procesów zachodzących w zaczynie i strefach przejściowych, dlatego ich pomiar nie wystarcza do wyjaśnienia mechanizmu obserwowanych zmian.

1.3. Luka badawcza, cel i zakres artykułu

Stan wiedzy dotyczący jednorazowego stosowania kruszywa betonowego jest stosunkowo szeroki, natomiast badania kolejnych generacji są mniej liczne i koncentrują się przede wszystkim na właściwościach makroskopowych. Znacznie rzadziej analizuje się w jednym programie badawczym kinetykę wydzielania ciepła, skład fazowy, stopień hydratacji, strukturę porów oraz budowę wielu stref przejściowych. Porównywanie dostępnych wyników utrudniają różne definicje cyklu recyklingu, odmienne poziomy zastąpienia kruszywa, niejednakowe sposoby korekty wody, zróżnicowany stan nasycenia ziaren i brak pełnych danych o betonie macierzystym. Brakuje zatem spójnej syntezy łączącej

liczbę cykli recyklingu z bilansem wodnym, przebiegiem hydratacji i wieloskalowym rozwojem mikrostruktury.

Celem artykułu jest krytyczny przegląd i uporządkowanie wyników badań dotyczących wpływu wielokrotnego recyklingu kruszywa betonowego na kinetykę hydratacji cementu oraz rozwój mikrostruktury nowego zaczynu. Analiza obejmuje ewolucję właściwości kruszywa w kolejnych cyklach, konkurencyjne mechanizmy absorpcji i uwalniania wody, zmiany składu fazowego, strukturę porową oraz rozwój starych i nowych stref przejściowych. Szczególna uwaga zostanie poświęcona przyczynom rozbieżności między publikacjami, jakości dostępnych dowodów i ograniczeniom stosowanych metod badawczych. Właściwości mechaniczne i trwałościowe zostaną uwzględnione wyłącznie jako makroskopowe następstwa zmian zachodzących w zaczynie i na granicach faz. Końcowym rezultatem przeglądu będzie wskazanie zagadnień dobrze rozpoznanych, obszarów niejednoznacznych oraz kierunków badań potrzebnych do projektowania betonu zdolnego do bezpiecznego funkcjonowania w wielu kolejnych cyklach materiałowych.

2. Materiał i metody

2.1. Charakter i zakres przeglądu

Materiał źródłowy stanowiły recenzowane publikacje naukowe dotyczące wielokrotnego recyklingu kruszywa betonowego oraz prace wyjaśniające mechanizmy hydratacji i rozwoju mikrostruktury w betonach z kruszywem wtórnym. Przegląd opracowano jako krytyczny przegląd narracyjny z elementami przeglądu zakresowego. Takie podejście umożliwia jednocześnie uporządkowanie terminologii, identyfikację dominujących kierunków badań oraz ocenę przyczyn rozbieżności między wynikami uzyskiwanymi dla różnych generacji betonu [Arksey i O'Malley, 2005; Snyder, 2019].

Zakres analizy obejmował trzy powiązane poziomy: ewolucję właściwości kruszywa w kolejnych cyklach, wpływ materiału wtórnego na kinetykę hydratacji nowego spoiwa oraz rozwój struktury porowej i stref przejściowych. Publikacje dotyczące wyłącznie jednorazowego recyklingu uwzględniano pomocniczo, gdy opisywały mechanizmy niezbędne do interpretacji recyklingu wielokrotnego, takie jak absorpcja i desorpcja wody, efekt zarodkowania, pielęgnacja wewnętrzna albo budowa strefy stara zaprawa-nowy zaczyn. Nie wykonywano metaanalizy, ponieważ porównywane badania różniły się jakością betonu macierzystego, liczbą cykli, udziałem i frakcją kruszywa, stanem jego nasycenia, sposobem korekty wody oraz zakresem metod mikrostrukturalnych.

2.2. Strategia identyfikacji literatury

Literaturę identyfikowano wieloetapowo w lipcu 2026 r. z wykorzystaniem Google Scholar, Crossref oraz platform wydawców ScienceDirect, SpringerLink i MDPI. Wyszukiwanie prowadzono bez początkowego ograniczenia roku publikacji, a zakres aktualizowano do 15 lipca 2026 r. Zastosowano angielskie hasła: „multiple recycling concrete”, „multi-recycled concrete aggregate”, „repeated recycled aggregate concrete”, „closed-loop concrete recycling”, „hydration kinetics recycled aggregate”, „cement hydration recycled concrete aggregate”, „microstructure multi-recycled concrete” oraz „interfacial transition zone multi-recycled aggregate”. Hasła łączono z terminami odnoszącymi się do

metod: „isothermal calorimetry”, „XRD”, „TG/DTG”, „SEM/EDS”, „MIP”, „X-ray microtomography”, „NMR”, „nanoindentation” i „internal curing”.

W celu zwiększenia kompletności zbioru analizowano bibliografie publikacji kluczowych oraz prace, które je cytowały. Sprawdzano również różne warianty terminologiczne odnoszące się do betonu pierwszej, drugiej i trzeciej generacji. Rekordy o zbliżonych tytułach, tych samych autorach i identycznych identyfikatorach DOI traktowano jako duplikaty. Dane bibliograficzne i adresy DOI weryfikowano na stronie wydawcy albo w rejestrze Crossref.

2.3. Kryteria włączenia i wyłączenia

Do przeglądu włączano artykuły recenzowane, rozdziały naukowe i prace przeglądowe, jeżeli dotyczyły co najmniej jednego ponownego cyklu wykorzystania kruszywa betonowego albo dostarczały danych bezpośrednio przydatnych do oceny hydratacji i mikrostruktury. Pierwszeństwo nadawano badaniom, w których jednoznacznie określono pochodzenie kruszywa, numer generacji, udział zastąpienia, frakcję ziarnową, stan wilgotnościowy, sposób kompensacji absorpcji, skład spoiwa, stosunek woda-cement (w/c) lub woda-spoivo (w/b), warunki dojrzewania i zastosowane metody analityczne.

Wyłączano opracowania dotyczące wyłącznie kruszyw ceglanych, asfaltowych lub niesegregowanych odpadów budowlanych, jeżeli nie było możliwe wydzielenie wpływu kruszywa betonowego. Pomijano także publikacje ograniczone do zastosowań drogowych bez spoiwa cementowego, materiały konferencyjne pozbawione pełnego opisu metodyki, powielone wersje tych samych badań oraz prace przedstawiające jedynie wyniki numeryczne bez walidacji materiałowej. Badania właściwości mechanicznych i trwałościowych kwalifikowano tylko wtedy, gdy zawierały dane umożliwiające powiązanie zachowania makroskopowego z hydratacją, porowatością albo strefami przejściowymi.

2.4. Ekstrakcja, ocena i synteza danych

Dla każdej publikacji tworzone kartę danych obejmującą: rok i rodzaj opracowania, liczbę cykli recyklingu, charakterystykę betonu macierzystego, rodzaj i frakcję kruszywa, zawartość starej zaprawy, gęstość, nasiąkliwość i porowatość, stopień nasycenia, poziom zastąpienia kruszywa naturalnego, skład spoiwa, w/c lub w/b, sposób korekty wody, wiek próbek oraz zastosowane techniki badawcze. Osobno rejestrowano kierunek zmian czasu indukcji, maksimum strumienia ciepła i ciepła skumulowanego, udziału faz hydratacyjnych, rozkładu porów, liczby mikropęknięć oraz jakości starej i nowej strefy przejściowej.

Wiarygodność wniosków oceniano jakościowo na podstawie kompletności opisu materiałów, obecności serii odniesienia, kontroli bilansu wody, liczby powtórzeń, zastosowania metod komplementarnych i analizy statystycznej. Wyniki kodowano jako wskazujące na przyspieszenie, opóźnienie albo brak istotnej zmiany hydratacji oraz na wzrost, spadek albo brak jednoznacznej zmiany porowatości. Elementy zaleceń PRISMA-ScR wykorzystano pomocniczo do zwiększenia przejrzystości identyfikacji i selekcji źródeł, bez klasyfikowania opracowania jako pełnego przeglądu systematycznego [Tricco i in., 2018]. Syntezę przeprowadzono tematycznie i mechanistycznie, dzieląc ustalenia na zależności dobrze potwierdzone, wyniki niejednoznaczne oraz obszary wymagające dalszych badań.

3. Wyniki i dyskusja

3.1. Terminologia i modele wielokrotnego recyklingu

Wielokrotny recykling oznacza ponowne rozkruszenie betonu zawierającego już kruszywo wtórne i wykorzystanie otrzymanego materiału w następnej mieszance. Beton pierwotny stanowi generację wyjściową, beton pierwszej generacji zawiera kruszywo z betonu pierwotnego, a kolejne generacje powstają z kruszywa odzyskanego z poprzedniego cyklu [Abreu i in., 2018; Huda i Alam, 2014]. Porównania utrudnia brak jednolitej terminologii: część badań obejmuje pełny obieg zamknięty, inne tylko częściową wymianę kruszywa lub zmianę receptury betonu macierzystego. Dlatego numer cyklu powinien być zawsze uzupełniony informacją o frakcji kruszywa, poziomie zastąpienia, sposobie kruszenia i udziale materiału naturalnego.

3.2. Ewolucja właściwości kruszywa w kolejnych cyklach

Najlepiej potwierdzonym mechanizmem jest kumulacja porowatej starej zaprawy, która obniża gęstość, zwiększa nasiąkliwość i pogarsza odporność na ścieranie oraz rozdrabnianie [Sánchez de Juan i Alaejos Gutiérrez, 2009]. W następnych cyklach kruszywo może obejmować pozostałości zaprawy z kilku generacji, dawne strefy przejściowe oraz mikropęknięcia powstałe podczas kruszenia. Badania do trzeciej generacji wskazują zwykle na pogorszenie części cech fizycznych, lecz zmiany nie zawsze są liniowe [Huda i Alam, 2014; Salesa i in., 2017]. Mikrotomografia potwierdza ewolucję udziału zaprawy, pustek i ziaren pierwotnych, ale jej przebieg zależy od energii kruszenia i selekcji frakcji [Thomas i in., 2018]. Numer generacji nie powinien więc zastępować bezpośrednich wskaźników jakości: zawartości starej zaprawy, nasiąkliwości, gęstości i udziału frakcji drobnej.

3.3. Bilans wodny i kinetyka hydratacji

Na hydratację oddziałują konkurencyjne mechanizmy. Suche ziarna pobierają wodę zarobową, lokalnie obniżając efektywny w/c i ograniczając transport jonów, natomiast kruszywo wstępnie nasycone może oddawać wodę w późniejszym okresie i działać jako źródło pielęgnacji wewnętrznej. Badania kalorymetryczne wykazują, że niski stopień nasycenia RCA może zmniejszać ciepło skumulowane, a większa wilgotność sprzyjać intensywniejszej hydratacji [Duan i in., 2025]. Jednocześnie drobne cząstki starej zaprawy mogą tworzyć powierzchnie zarodkowania. W zaczynach z drobną frakcją z recyklingu obserwowano przyspieszenie hydratacji cementu przy równoczesnym spadku wytrzymałości dla większych poziomów zastąpienia [Abriak, Chu, Maherzi, Benzerzour i Rivard, 2023]. Nie wszystkie frakcje są jednak reaktywne; ich skład może być zdominowany przez fazy krystaliczne i niemal obojętny materiał mineralny [Nedeljković, Visser, Nijland, Valcke i Schlangen, 2021]. Bezpośrednich badań kalorymetrycznych obejmujących kilka pełnych cykli jest nadal mało. Obecny stan wiedzy wskazuje, że wilgotność kruszywa i sposób bilansowania wody mogą silniej wpływać na okres indukcji, maksimum strumienia ciepła i ciepło skumulowane niż sam numer generacji.

3.4. Skład fazowy i stopień hydratacji

Analiza XRD i TG/DTG jest utrudniona, ponieważ portlandyt, kalcyt, ettringit, pozostałości klinkieru i fazy C-S-H mogą pochodzić zarówno z nowego zaczynu, jak i ze starej zaprawy. Wzrost zawartości związanej wody lub portlandytu nie musi zatem oznaczać większego stopnia hydratacji nowego cementu. Wiarygodna ocena wymaga oznaczenia udziału starej zaprawy, wykonania pomiaru materiału wyjściowego oraz odniesienia wyników do rzeczywistej masy nowego spoiwa. Najlepsze rezultaty daje połączenie analizy fazowej, termograwimetrii, kalorymetrii i bilansu masowego. Literatura potwierdza możliwość efektu zarodkowania i obecność niezhidratyzowanych ziaren, ale nie rozstrzyga, czy w kolejnych cyklach przeważa ich reaktywność, czy efekt rozcieńczenia.

3.5. Rozwój struktury porowej i stref przejściowych

Mikrostruktura obejmuje ziarno pierwotne, starą zaprawę, nowy zaczyn oraz co najmniej dwie granice: kruszywo pierwotne-stara zaprawa i stara zaprawa-nowy zaczyn. W dalszych generacjach pozostają fragmenty wcześniejszych granic, tworząc hierarchiczny układ stref o różnym wieku i stopniu uszkodzenia. Mikropęknięcia po kruszeniu mogą łączyć pory starej i nowej matrycy, lecz chropowata powierzchnia RCA może jednocześnie poprawiać zakotwienie nowego zaczynu. SEM/EDS pozwalają określić morfologię i lokalny skład, MIP charakteryzuje rozkład porów, mikro-CT ujawnia trójwymiarową sieć pustek i pęknięć, a nanoindentacja umożliwia ocenę lokalnych właściwości mechanicznych. Żadna metoda nie opisuje całej struktury samodzielnie; potrzebne są analizy komplementarne [Pradhan, Kumar i Barai, 2020; Thomas i in., 2020]. Większa niejednorodność jest dobrze potwierdzona, lecz nie wykazano, że każdy kolejny cykl musi powodować proporcjonalne pogorszenie mikrostruktury.

3.6. Powiązanie mikrostruktury z właściwościami użytkowymi

Rosnący udział starej zaprawy zwykle obniża moduł sprężystości oraz zwiększa skurcz i pęcznienie, ponieważ w układzie przybywa porowatej matrycy cementowej. Wytrzymałość może jednak pozostać zbliżona do betonu odniesienia po skorygowaniu efektywnego w/b, objętości zaczynu i uziarnienia [Kim i in., 2023]. Trwałość zależy przede wszystkim od ciągłości porów i pęknięć oraz jakości nowych stref przejściowych, a nie tylko od porowatości całkowitej. Badania skurczu i trwałości potwierdzają, że skutki kolejnego cyklu są współkształtowane przez jakość kruszywa, pielęgnację i skład matrycy [Silva i in., 2021]. Za obiecujące predyktory uznaje się zawartość starej zaprawy, wczesną absorpcję wody, objętość porów kapilarnych i gęstość pęknięć.

3.7. Krytyczna synteza stanu badań

Dobrze potwierdzono znaczenie starej zaprawy, podwyższonej nasiąkliwości, wrażliwości na stan wilgotnościowy i obecności wielu stref przejściowych. Wiarygodne są również wyniki wskazujące, że właściwości można częściowo stabilizować przez kontrolę składu i technologii. Niejednoznaczny pozostaje natomiast kierunek zmian kinetyki hydratacji, całkowitego stopnia hydratacji i reaktywności materiału odzyskanego. Główne źródła rozbieżności to odmienne definicje cyklu, brak kontroli betonu macierzystego, różne sposoby korekty wody i niejednakowe poziomy zastąpienia.

Tabela 1. Krytyczna ocena stanu badań nad wielokrotnym recyklingiem betonu

Obszar	Stan wiedzy	Najważniejsze ograniczenie
Właściwości kruszywa	Dobrze potwierdzone: stara zaprawa zwiększa nasiąkliwość i niejednorodność.	Brak jednolitego sposobu oznaczania jakości po kolejnych cyklach.
Bilans wody	Dobrze potwierdzone: wilgotność RCA zmienia efektywny w/c i przebieg dojrzewania.	Różne zasady wstępnego nasycania i korekty wody.
Kinetyka hydratacji	Niepełne dane: możliwe przyspieszenie, opóźnienie albo efekt mieszany.	Nieliczne serie kalorymetryczne obejmujące kilka pełnych cykli.
Skład fazowy	Częściowo rozpoznany wpływ faz starej zaprawy i drobnych frakcji.	Trudność oddzielenia starego i nowego produktu hydratacji.
Pory i strefy przejściowe	Potwierdzona większa złożoność i obecność wielu granic faz.	Za mało ilościowych badań 3D i obserwacji zmian w czasie.
Perspektywa użytkowa	Możliwa stabilizacja właściwości przez projektowanie składu i obróbkę RCA.	Ograniczona walidacja długoterminowa i w skali przemysłowej.

Źródło: opracowanie własne na podstawie analizowanej literatury.

3.8. Perspektywy rozwoju i agenda badawcza

Najważniejszym zadaniem jest opracowanie protokołu referencyjnego obejmującego skład betonu macierzystego, liczbę i parametry kruszenia, frakcję, zawartość starej zaprawy, stan nasycenia oraz efektywny w/b. Należy utrzymywać stałą objętość nowego zaczynu i raportować absorpcję w pierwszych minutach, a nie wyłącznie po 24 godzinach. Kalorymetrię izotermiczną warto łączyć z czasowo rozdzielczym XRD, TG/DTG, NMR i pomiarami transportu wilgoci. Mikro-CT, SEM/EDS i nanoindentacja powinny służyć do trójwymiarowego i ilościowego rozdzielania starych oraz nowych stref przejściowych. Automatyczna segmentacja obrazu i uczenie maszynowe mogą ułatwić porównania, pod warunkiem utworzenia otwartych baz obejmujących rzeczywiste parametry kolejnych cykli.

Perspektywiczne są selektywne usuwanie słabej zaprawy, obróbka mechaniczna, powłoki mineralne i kontrolowana karbonatyzacja, które mogą zmniejszać nasiąkliwość oraz zagęszczać powierzchnię RCA [Shi i in., 2016; Zhang, Chen, Wang i Zhang, 2023]. Ocena tych metod musi uwzględniać energię, emisję, możliwość odzysku frakcji drobnej i zdolność materiału do następnego recyklingu. Równolegle potrzebne są badania kompatybilności z cementami wieloskładnikowymi, żużłami i glinami kalcynowanymi oraz długoterminowe testy elementów rzeczywistej skali. Docelowo kwalifikacja kruszywa powinna opierać się na mierzalnej jakości i wymaganiach użytkowych, a nie wyłącznie na sztywnym limicie udziału RCA lub liczbie cykli.

4. Wnioski

Wielokrotny recykling kruszywa betonowego prowadzi do kumulacji starej zaprawy, mikropęknięć i kolejnych stref przejściowych. W rezultacie wzrastają porowatość i nasiąkliwość materiału wtórnego, a jego gęstość maleje. Skala tych zmian zależy jednak nie tylko od numeru generacji, lecz także od jakości betonu macierzystego, technologii kruszenia oraz sposobu przygotowania kruszywa przed mieszaniem.

Nie można przypisać kruszywu wielokrotnie recyklingowanemu jednoznacznie przyspieszającego ani opóźniającego wpływu na hydratację. O przebiegu procesu decyduje bilans między poborem wody zarobowej przez suche, porowate ziarna a jej późniejszym uwalnianiem, które może zapewniać pielęgnację wewnętrzną. Dodatkowo drobne cząstki starej zaprawy i niezhidratyzowanego cementu mogą stanowić miejsca nukleacji. Porównywalność wyników wymaga więc określania efektywnego w/c i ścisłej kontroli stanu wilgotnościowego kruszywa.

Badania mikrostrukturalne są mniej rozwinięte niż ocena właściwości mechanicznych i trwałościowych. Potwierdzono powstawanie hierarchicznego układu porów oraz nakładanie się starych i nowych stref przejściowych, lecz brakuje badań śledzących te zmiany w sposób ciągły w kolejnych cyklach. Potrzebne jest zwłaszcza łączenie kalorymetrii izotermicznej z XRD, TG/DTG, SEM/EDS, porozymetrią, mikro-CT i metodami spektroskopowymi.

Priorytetem dalszych prac powinna być standaryzacja procedur wielokrotnego recyklingu oraz pełne raportowanie pochodzenia i składu betonu macierzystego. Obiecujące kierunki obejmują kontrolowaną karbonatyzację, selektywne usuwanie słabej zaprawy, powłoki mineralne, spoiwa niskoemisyjne i modele uczenia maszynowego. Wdrożenie przemysłowe wymaga jednak walidacji w skali technologicznej oraz określenia warunków, w których konieczne staje się uszlachetnianie kruszywa lub ograniczenie jego udziału w mieszaninie.

Wielokrotny recykling betonu należy więc traktować nie jako proste powtarzanie jednorazowego odzysku kruszywa, lecz jako proces prowadzący do ewolucji materiału kompozytowego. Lepsze rozpoznanie sprzężenia pomiędzy hydratacją, transportem wody i rozwojem mikrostruktury jest kluczowe dla projektowania betonów obiegowych o przewidywalnych właściwościach, długiej trwałości i rzeczywiście mniejszym oddziaływaniu środowiskowym.

Bibliografia:

1. Abreu V., Evangelista L., de Brito J. (2018). The effect of multi-recycling on the mechanical performance of coarse recycled aggregates concrete. *Construction and Building Materials*, 188, 480-489. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.07.178>
2. Abriak Y., Chu D. C., Maherzi W., Benzerzour M., Rivard P. (2023). Influence of fine recycled concrete aggregates use on the hydration kinetics and mechanical-microstructural properties of hydrated cement: Experimental and numerical approaches. *Construction and Building Materials*, 408, 133769. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.133769>
3. Arksey H., O'Malley L. (2005). Scoping studies: Towards a methodological framework. *International Journal of Social Research Methodology*, 8(1), 19-32. <https://doi.org/10.1080/1364557032000119616>

4. Duan Z., Li J., Zou S., Huang T., Li B., Hu Z., Li L. (2025). Hydration kinetics and modified model for effective water to cement ratio control in recycled aggregate concrete. *Case Studies in Construction Materials*, 23, e05217. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2025.e05217>
5. Huda S. B., Alam M. S. (2014). Mechanical behavior of three generations of 100% repeated recycled coarse aggregate concrete. *Construction and Building Materials*, 65, 574-582. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.05.010>
6. Kim J. (2024). Sustainable construction exploration: A review of multi-recycling of concrete waste. *International Journal of Environmental Research*, 18, 103. <https://doi.org/10.1007/s41742-024-00652-z>
7. Kim J., Grabiec A. M., Ubysz A., Yang S., Kim N. (2023). Influence of mix design on physical, mechanical and durability properties of multi-recycled aggregate concrete. *Materials*, 16(7), 2744. <https://doi.org/10.3390/ma16072744>
8. Nedeljković M., Visser J., Nijland T. G., Valcke S., Schlangen E. (2021). Physical, chemical and mineralogical characterization of Dutch fine recycled concrete aggregates: A comparative study. *Construction and Building Materials*, 270, 121475. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121475>
9. Pradhan S., Kumar S., Barai S. V. (2020). Multi-scale characterisation of recycled aggregate concrete and prediction of its performance. *Cement and Concrete Composites*, 106, 103480. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2019.103480>
10. Salesa Á., Pérez-Benedicto J. A., Colorado-Aranguren D., López-Julián P. L., Esteban L. M., Sanz-Baldúz L. J., Sáez-Hostaled J. L., Ramis J., Olivares D. (2017). Physico-mechanical properties of multi-recycled concrete from precast concrete industry. *Journal of Cleaner Production*, 141, 248-255. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.09.058>
11. Salesa Á., Esteban L. M., Lopez-Julian P. L., Pérez-Benedicto J. Á., Acero-Oliete A., Pons-Ruiz A. (2022). Evaluation of characteristics and building applications of multi-recycled concrete aggregates from precast concrete rejects. *Materials*, 15(16), 5714. <https://doi.org/10.3390/ma15165714>
12. Sánchez de Juan M., Alaejos Gutiérrez P. (2009). Study on the influence of attached mortar content on the properties of recycled concrete aggregate. *Construction and Building Materials*, 23(2), 872-877. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2008.04.012>
13. Shi C., Li Y., Zhang J., Li W., Chong L., Xie Z. (2016). Performance enhancement of recycled concrete aggregate - A review. *Journal of Cleaner Production*, 112, 466-472. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.08.057>
14. Silva S., Evangelista L., de Brito J. (2021). Durability and shrinkage performance of concrete made with coarse multi-recycled concrete aggregates. *Construction and Building Materials*, 272, 121645. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121645>
15. Snyder H. (2019). Literature review as a research methodology: An overview and guidelines. *Journal of Business Research*, 104, 333-339. <https://doi.org/10.1016/j.jbusres.2019.07.039>
16. Thomas C., de Brito J., Gil V., Sainz-Aja J. A., Cimentada A. (2018). Multiple recycled aggregate properties analysed by X-ray microtomography. *Construction and Building Materials*, 166, 171-180. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.01.130>

17. Thomas C., de Brito J., Cimentada A., Sainz-Aja J. A. (2020). Macro- and micro-properties of multi-recycled aggregate concrete. *Journal of Cleaner Production*, 245, 118843. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.118843>
18. Tricco A. C., Lillie E., Zarin W. i in. (2018). PRISMA Extension for Scoping Reviews (PRISMA-ScR): Checklist and Explanation. *Annals of Internal Medicine*, 169(7), 467-473. <https://doi.org/10.7326/M18-0850>
19. Zhang T., Chen M., Wang Y., Zhang M. (2023). Roles of carbonated recycled fines and aggregates in hydration, microstructure and mechanical properties of concrete: A critical review. *Cement and Concrete Composites*, 138, 104994. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2023.104994>

4. WPLYW WIELOKROTNEGO RECYKLINGU KRUSZYWA NA SKURCZ AUTOGENICZNY I PEŁZANIE BETONU — STAN BADAŃ I PERSPEKTYWA ROZWOJU

Krzysztof Liszka

Uniwersytet Przyrodniczy we Wrocławiu

Dyscyplina naukowa: inżynieria lądowa

E-mail: liszka.k@gmail.com

1. Wstęp

Produkcja betonu należy do najbardziej zasobochłonnych procesów przemysłowych, a zapotrzebowanie na kruszywa naturalne rośnie wraz z rozwojem infrastruktury. Jednocześnie sektor budowlany generuje znaczne ilości odpadów rozbiórkowych, których zagospodarowanie jest jednym z kluczowych wyzwań gospodarki o obiegu zamkniętym w Unii Europejskiej [Silva i in., 2015]. W tym kontekście kruszywo z recyklingu betonu (ang. *recycled concrete aggregate*, RCA) jest postrzegane jako racjonalna alternatywa dla kruszyw naturalnych, ograniczająca wydobycie surowców pierwotnych oraz redukująca objętość odpadów kierowanych na składowiska [Silva i in., 2021].

Większość dotychczasowych badań koncentruje się na kruszywie recyklingowanym pochodzącym z jednokrotnego cyklu przetworzenia. W praktyce gospodarki o obiegu zamkniętym należy jednak liczyć się z sytuacją, w której beton wykonany z RCA po zakończeniu użytkowania ponownie trafia do recyklingu, tworząc kolejne pokolenia kruszywa. Zjawisko to określa się mianem wielokrotnego recyklingu kruszywa [Thomas i in., 2018]. Każdy kolejny cykl prowadzi do wzrostu udziału starej zaprawy na powierzchni ziaren, obniżenia gęstości oraz zwiększenia porowatości i nasiąkliwości. Zmiany mają charakter asymptotyczny — ich intensywność maleje wraz z liczbą cykli, jednak nawet po trzech recyklingach właściwości kruszywa nie ulegają pełnej stabilizacji [Silva i in., 2021; Zega i Sosa, 2024].

Szczególne znaczenie inżynierskie mają odkształcenia zależne od czasu, przede wszystkim skurcz autogeniczny oraz pełzanie betonu. Skurcz autogeniczny jest wynikiem samowysuszenia zaczynu cementowego w warunkach braku wymiany wilgoci z otoczeniem i odpowiada głównie za ryzyko wczesnego zarysowania elementów o niskim stosunku wodno-cementowym [Zhang i in., 2020]. Pełzanie stanowi natomiast długotrwałe odkształcenie betonu pod stałym obciążeniem i decyduje o ugięciach elementów zginanych, o stratach siły sprężającej oraz o użyteczności konstrukcji w wieloletniej perspektywie [Fardoun i Saliba, 2022]. Oba zjawiska są silnie uzależnione od rodzaju kruszywa, jego sztywności, porowatości oraz zdolności do wewnętrznego uwalniania wody.

Literatura wskazuje dwa przeciwstawne kierunki wpływu RCA. Wprowadzenie kruszywa recyklingowanego zwykle zwiększa skurcz całkowity oraz odkształcenia pełzania — Domingo-Cabo i in. [2009] wykazali wzrost skurczu o około 70 % i pełzania o około 51 % po 180 dniach dla pełnej zamiany kruszywa naturalnego, a przeglądy [Silva i in., 2015]

podają wzrost skurczu w zakresie 15–60 % w funkcji udziału RCA. Równocześnie w przypadku skurczu autogenicznego obserwuje się tendencję odwrotną: porowate, nasycone wodą kruszywo działa jak rezerwuuar pielęgnacji wewnętrznej, ograniczając samowysuszenie zaczynu [Bendimerad i in., 2020; Silva i in., 2021]. Rozproszenie danych ilościowych, różnorodność stosowanych protokołów pomiarowych oraz nieliczne prace dotyczące drugiego i trzeciego cyklu recyklingu utrudniają jednak formułowanie ogólnych zaleceń projektowych.

Celem niniejszej pracy jest usystematyzowanie stanu wiedzy o wpływie wielokrotnego recyklingu kruszywa na skurcz autogeniczny i pełzanie betonu. Sformułowano cztery pytania badawcze: (1) jak zmieniają się właściwości fizyczne kruszywa w kolejnych cyklach recyklingu, (2) w jakim kierunku i w jakiej skali zmienia się skurcz autogeniczny oraz pełzanie betonu, (3) jakie mechanizmy tłumaczą obserwowane zmiany, (4) jakich danych brakuje w literaturze i w jakim kierunku powinny podążać dalsze badania. Zakres przeglądu obejmuje recenzowane publikacje z lat 2009–2024, dotyczące betonów zwykłych, wysokowartościowych i samozagęszczalnych z kruszywem grubym i drobnym z recyklingu.

2. Materiał i metody

Rozdział przedstawia metodykę przeprowadzonego przeglądu literatury: przyjęty typ przeglądu, strategię wyszukiwania, kryteria kwalifikacji publikacji oraz sposób ekstrakcji i syntezy danych. Opis pozwala na odtworzenie procesu selekcji i ocenę wiarygodności zebranego materiału.

2.1. Typ przeglądu

Zastosowano przegląd narracyjny z elementami przeglądu systematycznego. Podejście to łączy jawną, powtarzalną strategię wyszukiwania z jakościową syntezą wyników, właściwą dla obszarów badawczych, w których dane ilościowe są rozproszone i pochodzą z różnorodnych protokołów laboratoryjnych. Rezygnacja z formalnej metaanalizy statystycznej wynika z heterogeniczności metod pomiaru skurczu autogenicznego i pełzania, różnych klas cementu, stosunków w/c oraz czasów obserwacji stosowanych w cytowanych badaniach.

2.2. Strategia wyszukiwania literatury

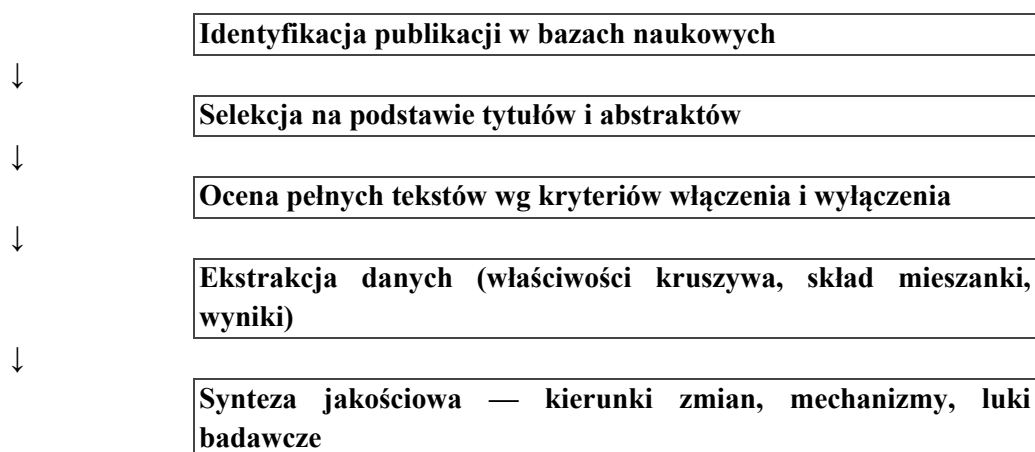
Przeszukano bazy: ScienceDirect (Elsevier), Wiley Online Library, MDPI, SpringerLink, ASCE Library oraz Google Scholar; uzupełniając wykorzystano repozytoria uczelniane oraz bazę PubMed Central dla artykułów z serii *Materials*. Zastosowano zapytania łączone operatorami logicznymi, wśród nich: „*recycled concrete aggregate*” AND „*autogenous shrinkage*”, „*recycled aggregate concrete*” AND „*creep*”, „*multi-recycled aggregate*” OR „*multiple recycling*” oraz „*long-term deformation*” AND „*recycled aggregate*”. Zakres czasowy obejmował lata 2009–2024, licząc od pracy Domingo-Cabo i in. [2009] — jednej z pierwszych całościowych publikacji o skurczu i pełzaniu betonu z RCA. Uzupełniając przeanalizowano listy piśmiennictwa najczęściej cytowanych przeglądów [Silva i in., 2015; Silva i in., 2021] w celu identyfikacji publikacji nieuchwyconych w wyszukiwaniu podstawowym.

2.3. Kryteria włączenia i wyłączenia

Do przeglądu włączono recenzowane artykuły oryginalne, artykuły przeglądowe oraz normy przedmiotowe (m.in. PN-EN 197-1, PN-EN 206, PN-EN 12620, PN-EN 1097-6), prezentujące dane ilościowe lub jednoznaczne opisy mechanizmów wpływu kruszywa recyklingowanego na skurcz autogeniczny albo pęczanie betonu. Wykluczono publikacje bez recenzji, streszczenia konferencyjne bez pełnego tekstu, prace dotyczące wyłącznie kruszyw ceramicznych, żużlowych lub szklanych bez odniesienia do RCA, a także artykuły ograniczone do zastosowań niekonstrukcyjnych (podbudowy drogowe, wypełnienia stabilizowane).

2.4. Ekstrakcja danych i synteza

Z każdej zakwalifikowanej publikacji odczytano ustandaryzowany zestaw informacji: liczbę cykli recyklingu, właściwości kruszywa (gęstość, nasiąkliwość, udział starej zaprawy), skład mieszanki (stosunek w/c, rodzaj i klasa cementu, udział RCA), wartości skurczu autogenicznego oraz pęczania, czas obserwacji, warunki dojrzewania. Zestawienie reprezentatywnych publikacji zawiera tabela 1 (rozdział 3.1). Synteza polega na porównaniu kierunku i skali zmian oraz na identyfikacji dominujących mechanizmów; zbiorcze zestawienia wartości względnych przedstawiono na wykresach 1–2 (rozdziały 3.2 i 3.3). Schemat procesu przeglądu przedstawiono na rysunku 1.



Rysunek 1. Schemat procesu przeglądu literatury

Źródło: opracowanie własne.

3. Wyniki i dyskusja — synteza literatury

Rozdział prezentuje syntezę ustaleń pochodzących z wybranych, recenzowanych publikacji. Każde stwierdzenie o kierunku zmian lub wartości liczbowej jest powiązane z konkretnym źródłem. Dyskusję poprowadzono wokół sześciu tematów: właściwości kruszywa w kolejnych cyklach recyklingu, skurcz autogeniczny, pęczanie, mechanizmy fizykochemiczne, modele prognostyczne oraz luki badawcze.

3.1. Właściwości kruszywa w kolejnych cyklach recyklingu

Kruszywo recyklingowane różni się od kruszywa naturalnego przede wszystkim obecnością starej zaprawy przyklejonej do ziaren. Silva, Evangelista i de Brito [2021]

wykazali, że wraz z liczbą cykli recyklingu kruszywo wykazuje systematyczne pogorszenie właściwości: rośnie nasiąkliwość i porowatość, maleje gęstość ziaren, a odporność na ścieranie w teście Los Angeles się obniża. Autorzy podkreślają, że zmiany mają charakter asymptotyczny — ich intensywność maleje z każdym kolejnym cyklem, jednak trzy cykle nie wystarczyły do pełnej stabilizacji parametrów [Silva i in., 2021].

Zega i Sosa [2024] rozszerzyli obserwację na pięć cykli recyklingu przy udziale kruszywa recyklingowanego 75 % w mieszance. Ich wyniki potwierdzają, że nasiąkliwość, porowatość i abrazja kruszywa rosną z liczbą cykli, natomiast do trzeciego cyklu obserwuje się jednoznaczne pogorszenie właściwości, a przy czwartym i piątym cyklu tempo zmian dalej maleje [Zega i Sosa, 2024]. Wspólnym mianownikiem obu prac jest wskazanie akumulacji starej zaprawy jako głównej przyczyny zmian — z każdym cyklem stara zaprawa poprzedniej generacji dołącza do zaprawy z jeszcze starszych pokoleń, tworząc na powierzchni ziaren wielowarstwową, porowatą powłokę.

Thomas i in. [2018] przeanalizowali kruszywo wielokrotnie recyklingowane metodą mikrotomografii rentgenowskiej i wykazali, że wewnętrzna struktura porowata narasta wraz z liczbą cykli, przy czym mikropęknięcia powstałe podczas kruszenia stanowią dodatkowe źródło osłabienia mechanicznego kruszywa.

Tabela 1. Zestawienie reprezentatywnych publikacji o wpływie kruszywa recyklingowanego na skurcz i pęzanie betonu

Źródło (autor, rok)	Zakres badań	Główne ustalenia ilościowe
Domingo-Cabo i in. [2009]	RCA 20 %, 50 %, 100 %; obserwacja 180 dni	Wzrost skurczu o 70 % i pęzania o 51 % przy 100 % RCA względem betonu referencyjnego
Silva, de Brito, Dhir [2015]	Przegląd literatury (metaanaliza korekcji)	Skurcz RAC do 1,97× skurczu NAC przy 100 % grubego RCA; wzrost 46–57 % przy 100 % drobnego RCA
Zhi i in. [2020]	Beton z RCA z betonu macierzystego 30 i 80 MPa; SRA	Wzrost pęzania w 180 dniach: RCA30 o 50,3 %, RCA80 o 16,4 % względem NAC
Zhang i in. [2020]	Model skurczu autogenicznego RAC (kruszywo grube i drobne)	Sformułowany model uwzględniający porowatość kruszywa i pielęgnację wewnętrzną
Bendimerad i in. [2020]	Wczesny wiek betonu; kruszywo grube i drobne RCA	Obniżenie skurczu autogenicznego wraz ze wzrostem udziału RCA; efekt pielęgnacji wewnętrznej
Silva, Evangelista, de Brito [2021]	RCA 25 % i 100 % po 1, 2 i 3 cyklach recyklingu	Asymptotyczne pogorszenie właściwości kruszywa i skurczu; brak stabilizacji po 3 cyklach
Fardoun, Saliba [2022]	Beton ziemny z drobnym RCA; obserwacja 2 miesiące	Wzrost skurczu wysychania (77 %) i pęzania podstawowego (12 %) przy zamianie NS na RS
Zega, Sosa [2024]	Pięć cykli recyklingu, 75 % udział CRA	Nasiąkliwość, porowatość i abrazja rosną z liczbą cykli; moduł sprężystości maleje

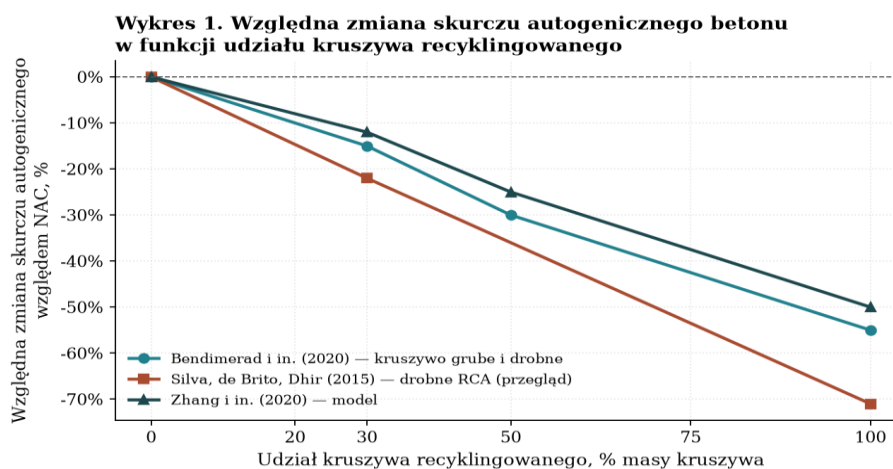
Źródło: opracowanie własne na podstawie cytowanych publikacji.

3.2. Skurcz autogeniczny betonu z kruszywem recyklingowanym

Skurcz autogeniczny betonu z kruszywem recyklingowanym rozwija się odmiennie niż całkowity skurcz w warunkach wysychania. Bendimerad i in. [2020] wykazali, że wprowadzenie kruszywa recyklingowanego — zarówno grubego, jak i drobnego — redukuje skurcz autogeniczny wraz ze wzrostem stopnia zastąpienia kruszywa naturalnego. Odpowiedzialny jest za to efekt pielęgnacji wewnętrznej: nasycone wodą, porowate ziarna RCA stopniowo uwalniają wilgoć do zaczynu cementowego, ograniczając samowysuszenie i redukując naprężenia kapilarne.

Zhang i in. [2020] zaproponowali model skurczu autogenicznego uwzględniający porowatość kruszywa oraz stopień jego nasycenia. Model potwierdza, że wraz ze wzrostem porowatości kruszywa wielkość skurczu autogenicznego betonu maleje w sposób monotoniczny, przy czym stopień redukcji zależy od stosunku w/c oraz od udziału kruszywa w mieszance.

Kierunek ten pozostaje spójny w kontekście wielokrotnego recyklingu: skoro kolejne cykle zwiększają porowatość i nasiąkliwość kruszywa [Silva i in., 2021; Zega i Sosa, 2024], można oczekiwać, że betony z kruszywem po drugim i trzecim cyklu wykazywałyby silniejszy efekt pielęgnacji wewnętrznej. Bezpośrednich pomiarów skurczu autogenicznego dla drugiego i trzeciego cyklu recyklingu w literaturze jest jednak niewiele — jest to jedna z podstawowych luk badawczych zidentyfikowanych w niniejszym przeglądzie.



Źródło: opracowanie własne na podstawie Bendimerad i in. (2020), Silva, de Brito, Dhir (2015), Zhang i in. (2020).

Wykres 1. Względna zmiana skurczu autogenicznego betonu w funkcji udziału RCA według danych z literatury

Źródło: opracowanie własne na podstawie Bendimerad i in. (2020), Silva, de Brito, Dhir (2015), Zhang i in. (2020).

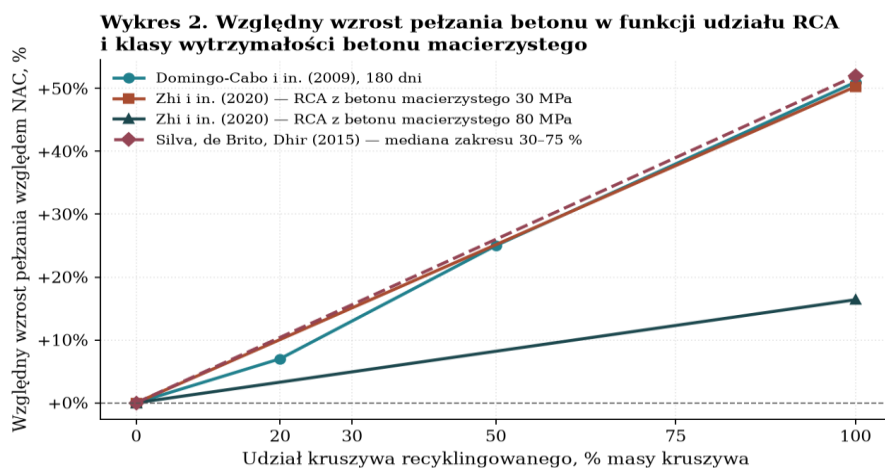
3.3. Pęcznienie betonu z kruszywem recyklingowanym

W odróżnieniu od skurczu autogenicznego pęcznienie betonu wzrasta wraz z udziałem kruszywa recyklingowanego. Klasyczne wyniki Domingo-Cabo i in. [2009] wskazują, że pełna zamiana kruszywa naturalnego kruszywem recyklingowanym powoduje wzrost pęcznienia o około 51 % po 180 dniach. Zhi i in. [2020] uzyskali podobne rezultaty w badaniach z zastosowaniem kruszywa recyklingowanego pochodzącego z betonu macierzystego o dwóch klasach wytrzymałości: pęcznienie w 180 dniach wzrosło o 50,3 % dla kruszywa

z betonu 30 MPa (seria RCA30) i o 16,4 % dla kruszywa z betonu 80 MPa (seria RCA80). Wynika stąd, że jakość betonu macierzystego jest jednym z kluczowych czynników różnicujących pękanie.

Silva, de Brito i Dhir [2015] w metaanalizie danych literaturowych podają, że wzrost pękania w RAC z pełną zamianą kruszywa wynosi typowo 30–75 %, przy czym istotne różnice wynikają nie z samego udziału kruszywa, lecz z jakości ziaren — a konkretnie z ilości i porowatości starej zaprawy. Fardoun i Saliba [2022], badając beton ziemny z drobnym kruszywem recyklingowanym, zaobserwowali stosunkowo niewielki wzrost pękania podstawowego (12 %) przy wyraźnym wzroście skurczu wysychania (77 %), co potwierdza wrażliwość obu zjawisk na typ kruszywa i warunki środowiskowe.

Bezpośrednie pomiary pękania dla drugiego i trzeciego cyklu recyklingu są w literaturze rzadkością. Silva i in. [2021] koncentrują się na skurczu i trwałości, natomiast Zega i Sosa [2024] podają, że przy 75 % udziale kruszywa wielokrotnie recyklingowanego moduł sprężystości maleje z liczbą cykli, co pośrednio sugeruje wzrost pękania — pękanie nie było jednak w tej pracy przedmiotem bezpośredniego pomiaru.



Źródło: opracowanie własne na podstawie Domingo-Cabo i in. (2009), Zhi i in. (2020), Silva, de Brito, Dhir (2015).

Wykres 2. Względna zmiana pękania betonu w funkcji udziału RCA i klasy betonu macierzystego według danych z literatury

Źródło: opracowanie własne na podstawie Domingo-Cabo i in. (2009), Zhi i in. (2020), Silva, de Brito, Dhir (2015).

3.4. Mechanizmy tłumaczące obserwowane zmiany

Za przeciwstawne kierunki zmian skurczu autogenicznego i pękania odpowiadają dwa mechanizmy fizykochemiczne. Pierwszy z nich to pielęgnacja wewnętrzna: porowate ziarna RCA, nasycone wodą, uwalniają ją stopniowo do zaczynu, kompensując samowysuszenie i redukując naprężenia kapilarne odpowiedzialne za skurcz autogeniczny [Bendimerad i in., 2020; Zhang i in., 2020].

Drugi mechanizm dotyczy pękania i wiąże się z obniżonym modułem sprężystości ziaren zawierających starą, porowatą zaprawę oraz z osłabioną strefą przejściową zaczyn–kruszywo. Zhi i in. [2020] wykazali, że kruszywo z betonu macierzystego o niższej wytrzymałości daje betony o wyraźnie wyższym pękaniu, ponieważ stara zaprawa ma wtedy niższą sztywność i większą podatność na deformację. Silva, de Brito i Dhir [2015]

podkreślają, że to właśnie udział i jakość starej zaprawy, a nie sam procentowy udział kruszywa w mieszance, są głównym predykatorem wzrostu pełzania.

Silva, Evangelista i de Brito [2021] wskazują ponadto, że wstępne nasycenie RCA (stan SSD) oraz zastosowanie techniki mieszania dwuetapowego pozwalają ograniczyć negatywny wpływ kruszywa na odkształcenia długotrwałe, częściowo kompensując pogorszenie strefy przejściowej.

3.5. Porównanie z modelami prognostycznymi

Skurcz i pełzanie betonu opisywane są zwykle za pomocą modeli normowych: CEB-FIP Model Code 2010, ACI 209R-92, GL2000 oraz B4 (RILEM). Zhang i in. [2020] wykazali, że modele te — opracowane dla betonu z kruszywa naturalnego — systematycznie zaniżają skurcz i pełzanie betonów z RCA, ponieważ nie uwzględniają odmiennej charakterystyki kruszywa recyklingowanego. W literaturze zaproponowano współczynniki korekcyjne uwzględniające udział RCA [Silva i in., 2015], jednak żaden z modeli w wersji standardowej nie zawiera liczby cykli recyklingu jako parametru wejściowego. Jest to istotna luka projektowa, szczególnie w kontekście długoterminowych prognoz ugięć i strat siły sprężającej w konstrukcjach z betonu wielokrotnie recyklingowanego.

3.6. Luki badawcze

Synteza literatury pozwala wskazać cztery główne luki badawcze. Po pierwsze, brak bezpośrednich pomiarów skurczu autogenicznego i pełzania dla kruszywa po drugim i trzecim cyklu recyklingu w warunkach identycznych z pomiarami dla kruszywa jednokrotnie recyklingowanego. Po drugie, brak jednolitych protokołów pomiarowych — różne badania stosują różne czasy obserwacji, poziomy obciążenia, warunki dojrzewania i wilgotności, co uniemożliwia formalną metaanalizę statystyczną. Po trzecie, modele prognostyczne skurczu i pełzania nie uwzględniają liczby cykli recyklingu, choć wiadomo, że parametr ten wpływa na właściwości kruszywa. Po czwarte, w literaturze brakuje danych o zachowaniu betonów z RCA po drugim i trzecim cyklu w warunkach zbliżonych do rzeczywistych — dostępne badania są prowadzone niemal wyłącznie w warunkach laboratoryjnych.

4. Podsumowanie

Przegląd literatury z lat 2009–2024 pozwala sformułować sześć wniosków dotyczących wpływu wielokrotnego recyklingu kruszywa na skurcz autogeniczny i pełzanie betonu.

1. W kolejnych cyklach recyklingu rośnie na powierzchni ziaren udział starej zaprawy, co powoduje wzrost nasiąkliwości i porowatości oraz obniżenie gęstości kruszywa; zmiany te mają charakter asymptotyczny, ale nawet po trzech cyklach nie osiągają pełnej stabilizacji [Silva i in., 2021; Zega i Sosa, 2024].
2. Skurcz autogeniczny betonu z kruszywem recyklingowanym jest niższy niż betonu referencyjnego, a mechanizmem odpowiedzialnym za tę tendencję jest pielęgnacja wewnętrzna dostarczana przez porowate ziarna nasycone wodą [Bendimerad i in., 2020; Zhang i in., 2020].

3. Pełzanie betonu z kruszywem recyklingowanym jest wyższe niż betonu referencyjnego — wzrost mieści się w zakresie od kilkunastu do ponad pięćdziesięciu procent i zależy głównie od jakości starej zaprawy przyklejonej do ziaren, a nie od samego udziału kruszywa w mieszance [Domingo-Cabo i in., 2009; Silva i in., 2015; Zhi i in., 2020].
4. Nasiąkliwość kruszywa oraz udział starej zaprawy są parametrami najsilniej powiązanymi z wielkością odkształceń zależnych od czasu — mogą służyć jako proste kryteria oceny przydatności kruszywa wielokrotnie recyklingowanego do produkcji betonu konstrukcyjnego.
5. Standardowe modele prognostyczne skurczu i pełzania (CEB-FIP MC2010, ACI 209R-92, GL2000, B4) systematycznie zaniżają wartości dla betonów z kruszywem recyklingowanym i — w wersjach podstawowych — nie uwzględniają liczby cykli recyklingu jako parametru wejściowego [Zhang i in., 2020].
6. Bezpośrednie pomiary skurczu autogenicznego i pełzania dla drugiego i trzeciego cyklu recyklingu są w literaturze rzadkością; heterogeniczność protokołów pomiarowych utrudnia formalną metaanalizę statystyczną.

Kierunki dalszych badań obejmują: (i) prowadzenie długoterminowych pomiarów pełzania i skurczu autogenicznego dla drugiego i trzeciego cyklu recyklingu w ujednoliconych warunkach, (ii) opracowanie modeli prognostycznych zawierających liczbę cykli recyklingu jako zmienną, (iii) badania mikrostrukturalne strefy przejściowej zaczyn–kruszywo dla kolejnych pokoleń RCA oraz (iv) analizę wpływu wstępnego nasycenia kruszywa i technik mieszania dwuetapowego na skurcz autogeniczny i pełzanie betonów z wielokrotnie recyklingowanym kruszywem.

Bibliografia:

1. Bendimerad A. Z., Delsaute B., Rozière E., Staquet S., Loukili A. (2020). Advanced techniques for the study of shrinkage-induced cracking of concrete with recycled aggregates at early age. *Construction and Building Materials*, 233, 117340. DOI: *10.1016/j.conbuildmat.2019.117340*.
2. Domingo-Cabo A., Lázaro C., López-Gayarre F., Serrano-López M. A., Serna P., Castaño-Tabares J. O. (2009). Creep and shrinkage of recycled aggregate concrete. *Construction and Building Materials*, 23(7), 2545–2553. DOI: *10.1016/j.conbuildmat.2009.02.018*.
3. Fardoun H., Saliba J. (2022). Long-term deformations and mechanical properties of fine recycled aggregate earth concrete. *Sustainability*, 15(1), 384. DOI: *10.3390/su15010384*.
4. Geng Y., Wang Y., Chen J. (2016). Creep behaviour of concrete using recycled coarse aggregates obtained from source concrete with different strengths. *Construction and Building Materials*, 128, 199–213. DOI: *10.1016/j.conbuildmat.2016.10.086*.
5. Pedro D., de Brito J., Evangelista L. (2017). Mechanical, durability and long-term behavior of concrete made with recycled coarse aggregates sourced from construction and demolition waste. *Construction and Building Materials*, 154, 294–309. DOI: *10.1016/j.conbuildmat.2017.07.215*.
6. Revilla-Cuesta V., Evangelista L., de Brito J., Skaf M., Manso J. M. (2022). Shrinkage prediction of recycled aggregate structural concrete with alternative binders through partial correction coefficients. *Cement and Concrete Composites*, 129, 104506. DOI: *10.1016/j.cemconcomp.2022.104506*.

7. Silva R. V., de Brito J., Dhir R. K. (2015). Prediction of the shrinkage behavior of recycled aggregate concrete: A review. *Construction and Building Materials*, 77, 327–339. DOI: *10.1016/j.conbuildmat.2014.12.102*.
8. Silva S., Evangelista L., de Brito J. (2021). Durability and shrinkage performance of concrete made with coarse multi-recycled concrete aggregates. *Construction and Building Materials*, 272, 121645. DOI: *10.1016/j.conbuildmat.2020.121645*.
9. Thomas C., Setién J., Polanco J. A., Lombillo I., Cimentada A. (2018). Multiple recycled aggregate properties analysed by X-ray microtomography. *Construction and Building Materials*, 166, 171–180. DOI: *10.1016/j.conbuildmat.2018.01.130*.
10. Zega C. J., Sosa M. E. (2024). Propiedades de agregados y hormigones reciclados obtenidos a partir de sucesivos ciclos de reciclado. *Revista Hormigón*, 64, 24–37.
11. Zhang H., Wang Y., Lehman D. E., Geng Y., Kuder K. (2020). Autogenous-shrinkage model for concrete with coarse and fine recycled aggregate. *Cement and Concrete Composites*, 111, 103600. DOI: *10.1016/j.cemconcomp.2020.103600*.
12. Zhi D., Gao P., Chen K., Ye J., Wang Y. (2020). Mechanical properties and creep of concrete manufactured with recycled coarse aggregates from different parent concrete with shrinkage-reducing admixture. *Materials*, 13(23), 5333. DOI: *10.3390/ma13235333*.
13. PN-EN 197-1:2012. Cement — Część 1: Skład, wymagania i kryteria zgodności dotyczące cementów powszechnego użytku. Polski Komitet Normalizacyjny, Warszawa.
14. PN-EN 206+A2:2021-08. Beton — Wymagania, właściwości użytkowe, produkcja i zgodność. Polski Komitet Normalizacyjny, Warszawa.
15. PN-EN 12620+A1:2010. Kruszywa do betonu. Polski Komitet Normalizacyjny, Warszawa.
2. PN-EN 1097-6:2022-07. Badania mechanicznych i fizycznych właściwości kruszyw — Część 6: Oznaczanie gęstości ziaren i nasiąkliwości. Polski Komitet Normalizacyjny, Warszawa.

5. TRWAŁOŚĆ BETONÓW Z KRUSZYWEM PO WIELOKROTNYM RECYKLINGU W WARUNKACH AGRESJI ŚRODOWISKOWEJ (MROZOODPORNOŚĆ, KARBONATYZACJA, CHLORKI) – STAN WIEDZY I KIERUNKI DAJSZYCH BADAŃ

Krzysztof Liszka

Uniwersytet Przyrodniczy we Wrocławiu

Dyscyplina naukowa: inżynieria lądowa

E-mail: liszka.k@gmail.com

1. Wprowadzenie

Beton pozostaje podstawowym materiałem konstrukcyjnym, lecz jego masowe stosowanie wiąże się z dużym zapotrzebowaniem na kruszywa naturalne oraz powstawaniem znacznego strumienia odpadów budowlanych i rozbiórkowych. Założenia gospodarki o obiegu zamkniętym wymagają nie tylko zagospodarowania gruzu betonowego w warstwach drogowych lub nasypach, lecz przede wszystkim utrzymywania materiału w możliwie wysokiej jakości obiegu, czyli ponownego zastosowania go do produkcji betonu (European Commission, 2020; Silva et al., 2014; de Brito i Saikia, 2013). W tym ujęciu kruszywo z recyklingu betonu nie powinno być traktowane wyłącznie jako jednorazowy zamiennik kruszywa naturalnego. Docelowym rozwiązaniem jest układ zamknięty, w którym beton zawierający kruszywo recyklingowe po zakończeniu użytkowania może zostać ponownie rozdrobniony i wykorzystany w kolejnej generacji materiału.

Wielokrotny recykling prowadzi jednak do stopniowej zmiany budowy ziaren. Kruszywo pierwszej generacji składa się z rdzenia pierwotnego kruszywa naturalnego oraz przyczepionej zaprawy. Po następnym cyklu na ziarnach mogą współistnieć kolejne warstwy zaprawy i stref przejściowych, a część ziaren stanowią fragmenty niemal całkowicie zbudowane ze starego zaczynu. Zjawiskom tym towarzyszą mikropęknięcia powstające podczas eksploatacji, rozbiórki i kruszenia. W rezultacie kolejne generacje kruszywa mogą wykazywać mniejszą gęstość, większą nasiąkliwość, bardziej rozwiniętą porowatość i większą podatność na rozdrabnianie (Silva et al., 2014; de Brito i Saikia, 2013; Marie i Quiasrawi, 2012; Poon et al., 2004; Etxeberria et al., 2007; Tam et al., 2005; Katz, 2003). Badania zamkniętego obiegu recyklingu potwierdziły techniczną możliwość ponownego wytwarzania betonu z kruszywa pochodzącego z wcześniejszych generacji, ale jednocześnie wykazały kumulowanie się cech starej zaprawy i konieczność coraz dokładniejszego sterowania składem mieszanki (Marie i Quiasrawi, 2012).

Dla konstrukcyjnego wykorzystania takiego materiału decydująca jest nie tylko wytrzymałość początkowa, lecz zdolność do zachowania wymaganych właściwości w całym projektowanym okresie użytkowania. Dotyczy to zwłaszcza ekspozycji na cykliczne zamrażanie i rozmrażanie, wnikanie dwutlenku węgla oraz działanie chlorków. Mechanizmy te są bezpośrednio związane z dostępnością wody, ciągłością układu porów, przepuszczalnością stref przejściowych i obecnością rys. Są to jednocześnie właściwości

szczególnie wrażliwe na jakość kruszywa recyklingowego (Otsuki et al., 2003; Levy i Helene, 2004; Evangelista i de Brito, 2010; Thomas et al., 2013; Bravo et al., 2015; Kou i Poon, 2012; Kou et al., 2011; Tuyan et al., 2014; Richardson et al., 2011). W praktyce nie można zatem zakładać, że beton kolejnej generacji zachowa trwałość jedynie dlatego, że osiągnął wymaganą wytrzymałość na ściskanie.

Celem artykułu jest usystematyzowanie wiedzy o trwałości betonów zawierających kruszywo po wielokrotnym recyklingu, ze szczególnym uwzględnieniem mrozoodporności, karbonatyzacji i transportu chlorków. Ponieważ bezpośrednich badań kilku kolejnych generacji jest nadal mało, analizę oparto również na szerzej rozwiniętej literaturze dotyczącej betonów z kruszywem po pierwszym cyklu. Wyniki te wykorzystano jako podstawę do identyfikacji mechanizmów, które mogą ulegać kumulacji w kolejnych obiegach, przy czym wyraźnie oddzielono obserwacje potwierdzone eksperymentalnie od wniosków wymagających dalszej weryfikacji.

2. Metodyka przeglądu literatury

Przegląd ukierunkowano na recenzowane publikacje dotyczące: właściwości kruszywa z recyklingu betonu, kolejnych cykli recyklingu, odporności na zamrażanie i rozmrażanie, karbonatyzacji, migracji i dyfuzji chlorków, sorpcyjności oraz metod poprawy jakości kruszywa i matrycy cementowej. Uwzględniono również opracowania przeglądowe, monografie oraz dokumenty normowe opisujące klasy ekspozycji i metody badań (Silva et al., 2014; de Brito i Saikia, 2013; Xiao et al., 2012; Behera et al., 2014; McNeil i Kang, 2013; Soares et al., 2014; CEN, 2021; CEN, 2016; CEN, 2020; Nordtest, 1999; fib, 2006).

W analizie przyjęto, że „wielokrotnie recyklingowane kruszywo betonowe” oznacza kruszywo uzyskane z betonu, który sam zawierał kruszywo recyklingowe. Jest to definicja węższa niż ogólne pojęcie kruszywa pochodzącego z wielokrotnego kruszenia jednego materiału. Rozróżnienie jest istotne, ponieważ w rzeczywistym cyklu materiałowym każda generacja obejmuje produkcję, dojrzewanie, ewentualną ekspozycję środowiskową, rozbiórkę, kruszenie i ponowne wbudowanie. Te etapy wpływają na skład mineralny, stan mikrospekta i stopień karbonatyzacji zaprawy przyczepionej.

Porównywanie wyników literaturowych jest utrudnione przez różne źródła gruzu, frakcje kruszywa, stopnie zastąpienia, metody kompensacji wody, klasy wytrzymałości, rodzaje cementu, dodatki mineralne i procedury ekspozycji. Z tego względu wnioski formułowano przede wszystkim na podstawie zgodności obserwowanych mechanizmów, a nie pojedynczych wartości liczbowych. W szczególności nie przenoszono bezpośrednio wyników badań przyspieszonych na przewidywany okres użytkowania konstrukcji bez uwzględnienia ograniczeń danej metody.

3. Zmiany właściwości kruszywa w kolejnych cyklach recyklingu

Najważniejszą cechą kruszywa betonowego jest obecność zaprawy przyczepionej do ziaren. W porównaniu z typowym kruszywem naturalnym ma ona większą porowatość i mniejszą gęstość, a jej udział decyduje o nasiąkliwości oraz podatności kruszywa na rozdrabnianie (Silva et al., 2014; de Brito i Saikia, 2013; Tam et al., 2005; Katz, 2003). Skład kruszywa nie jest jednorodny: część ziaren zawiera duży rdzeń naturalny, część ma postać kompozytu kruszywo–zaprawa, a najdrobniejsze lub najslabsze frakcje mogą składać się

głównie z zaczynu cementowego. Zmienność ta rośnie, gdy materiał pochodzi z nieselektywnej rozbiórki lub z betonów o różnym wieku i składzie.

W następnym cyklu recyklingu udział całkowitej zaprawy związanej z ziarnem może wzrastać, choć nie zawsze w sposób liniowy. Podczas kruszenia część starszej zaprawy zostaje usunięta, ale jednocześnie do ziarna dołączona jest zaprawa z najnowszej generacji betonu. Ostateczna właściwość kruszywa zależy zatem od bilansu odpajania i przyrastania warstw oraz od energii kruszenia. Badania zamkniętego obiegu wskazują, że bez dodatkowego uszlachetniania kolejne generacje wymagają większej korekty wody i wykazują pogorszenie części parametrów fizycznych (Marie i Quiasrawi, 2012). Wyniki te nie uzasadniają jednak prostego założenia, że każda kolejna generacja musi być zawsze proporcjonalnie gorsza. Jeżeli beton macierzysty ma niski współczynnik wodno-spoiwowy, jest dobrze pielęgnowany, a kruszywo jest selektywnie przetwarzane, nowa warstwa zaprawy może być gęstsza niż warstwa pochodząca z pierwszego obiektu.

Istotnym elementem jest wielokrotność stref przejściowych. W betonie z kruszywem naturalnym analizuje się głównie strefę pomiędzy nowym zaczynem i ziarnem. W betonie z kruszywem recyklingowym występuje dodatkowo stara strefa przejściowa między rdzeniem naturalnym a przyczepioną zaprawą. Po kolejnych cyklach liczba i geometria tych stref stają się jeszcze bardziej złożone. Obserwacje mikrostrukturalne potwierdzają, że najsłabsze miejsca mogą występować zarówno w nowej strefie przejściowej, jak i w starej zaprawie oraz na granicach warstw powstałych w różnych generacjach (Etxeberria et al., 2007; Tam et al., 2005; Katz, 2003; Otsuki et al., 2003). Z punktu widzenia trwałości tworzy to potencjalnie połączoną sieć dróg transportu wilgoci i jonów.

Stan wilgotności kruszywa silnie wpływa na mieszankę. Kruszywo suche odbiera część wody zarobowej, zmieniając lokalny efektywny współczynnik wodno-cementowy i urabialność. Kruszywo nasyczone powierzchniowo suche ogranicza ten efekt, lecz może wprowadzać do mieszanki znaczny zasób wody wewnętrznej. Wstępne nawilżanie może poprawiać urabialność i pielęgnację wewnętrzną, ale nadmierne nasycenie zwiększa stopień wypełnienia porów wodą, co jest niekorzystne przy oddziaływaniu mrozu. Poon i współautorzy (2004) wykazali, że stan wilgotności kruszywa recyklingowego istotnie zmienia konsystencję i wytrzymałość betonu. W betonach wielokrotnie recyklingowanych kontrola tego parametru powinna być bardziej rygorystyczna, ponieważ wzrost nasiąkliwości zwiększa błąd wynikający z przyjęcia uproszczonej korekty wody.

4. Mechanizmy kształtujące trwałość

Trwałość betonu z kruszywem recyklingowym jest wynikiem współdziałania właściwości kruszywa, matrycy cementowej i stref przejściowych. Sama obecność porowatego kruszywa nie przesądza jeszcze o niskiej trwałości. Decydujące jest, czy pory kruszywa i starej zaprawy tworzą ciągłe połączenia z porami nowej matrycy oraz czy beton osiągnął odpowiedni stopień zagęszczenia i hydratacji. Dlatego w literaturze spotyka się zarówno wyraźne pogorszenie właściwości transportowych, jak i wyniki zbliżone do betonu referencyjnego przy umiarkowanym udziale kruszywa oraz odpowiednio niskim współczynniku wodno-spoiwowym (Levy i Helene, 2004; Evangelista i de Brito, 2010; Thomas et al., 2013; Bravo et al., 2015; Kou i Poon, 2012; Kou et al., 2011).

Woda jest czynnikiem wspólnym dla wszystkich analizowanych mechanizmów. Umożliwia nasycenie porów przed zamarzaniem, uczestniczy w transporcie chlorków i warunkuje szybkość karbonatyzacji. Porowata przyczepiona zaprawa zwiększa pojemność sorpcyjną betonu, a mikropęknięcia powstałe podczas kruszenia skracają efektywne drogi transportu. Z drugiej strony część porów wewnątrz kruszywa może nie być połączona z powierzchnią w sposób umożliwiający szybki przepływ. Z tego względu całkowita nasiąkliwość nie powinna być jedynym wskaźnikiem trwałości; konieczne jest jej zestawienie z sorpcyjnością, przepuszczalnością, rezystywnością elektryczną, rozkładem wielkości porów oraz obserwacją rys.

Na wyniki silnie wpływa jakość betonu macierzystego. Kruszywo pochodzące z betonu o wysokiej wytrzymałości i niskim w/c może zachować korzystne właściwości nawet przy dużym udziale, podczas gdy materiał z betonu słabego lub zdegradowanego wprowadza do nowej mieszanki bardziej porowatą i spękaną fazę (Etxeberria et al., 2007; Tam et al., 2005; Katz, 2003; Thomas et al., 2013; Soares et al., 2014). W wielokrotnym recyklingu informacja o pochodzeniu powinna obejmować nie tylko ostatnią generację, lecz również historię wcześniejszych materiałów. Bez identyfikowalności strumienia odpadu trudno rozdzielić wpływ liczby cykli od wpływu jakości materiału początkowego.

Projektowanie trwałości powinno więc opierać się na parametrach użytkowych. Norma EN 206 określa klasy ekspozycji oraz wymagania dotyczące składu i właściwości betonu (CEN, 2021), lecz klasyczne podejście recepturowe nie uwzględnia wprost historii wielokrotnego recyklingu. Dla materiałów o zmiennej strukturze szczególnie uzasadnione jest uzupełnienie wymagań składowych badaniami efektywnej odporności na transport i degradację, wykonywanymi zgodnie z porównywalnymi procedurami (CEN, 2016; CEN, 2020; Nordtest, 1999; fib, 2006).

5. Mrozoodporność

Uszkodzenia mrozowe rozwijają się, gdy woda w porach zamarza, a powstające ciśnienia hydrauliczne i osmotyczne przekraczają zdolność matrycy do relaksacji naprężeń. Krytyczne znaczenie mają stopień nasycenia, rozkład porów, odległość do wolnych przestrzeni powietrznych oraz wytrzymałość na rozciąganie. Kruszywo recyklingowe może wpływać na każdy z tych elementów. Jego większa nasiąkliwość zwiększa zapas wody zdolnej do zamarzania, a mikropęknięcia i porowata zaprawa mogą ułatwiać jej migrację. Jednocześnie część porów kruszywa może działać jako zbiorniki odciążające, jeżeli nie są całkowicie nasycone. Z tego powodu wyniki badań nie są jednoznaczne i silnie zależą od przygotowania próbek.

Badania Tuyana i współautorów (2014) wykazały, że wzrost udziału grubego kruszywa recyklingowego w betonie samozagęszczalnym może pogarszać odporność na cykle zamrażania i rozmrażania oraz właściwości transportowe, szczególnie przy wysokim stopniu zastąpienia. Richardson i współautorzy (2011) również zwrócili uwagę, że beton z kruszywem rozbiórkowym może osiągać akceptowalną trwałość mrozową, ale wymaga właściwego napowietrzenia i kontroli jakości materiału. Szersze zestawienia wyników pokazują, że największe ryzyko występuje wtedy, gdy kruszywo jest silnie nasycone, mieszanka ma zbyt duży efektywny w/c, a system porów powietrznych nie został

zaprojektowany dla danej ekspozycji (Evangelista i de Brito, 2010; Thomas et al., 2013; Bravo et al., 2015; Behera et al., 2014; McNeil i Kang, 2013).

W wielokrotnym recyklingu możliwe jest kumulowanie trzech niekorzystnych efektów: wzrostu nasiąkliwości kruszywa, narastania liczby mikropęknięć oraz obniżania sztywności układu. Nie oznacza to jednak, że liczba cykli jest samodzielnym parametrem prognozującym. Jeżeli w kolejnych generacjach utrzymuje się stały efektywny współczynnik wodno-spoiwowy, stosuje napowietrzenie i kontroluje wilgotność kruszywa, spadek odporności może zostać ograniczony. Krytyczne jest rozróżnienie pomiędzy wodą wprowadzoną w celu wstępnego nasycenia kruszywa a wodą czynną w nowym zaczynie. Błędna korekta prowadzi do lokalnego zwiększenia w/c i tworzenia słabej strefy przejściowej.

Ocena mrozoodporności powinna obejmować więcej niż ubytek masy lub wizualne złuszczenie. Przydatne są zmiany dynamicznego modułu sprężystości, prędkości ultradźwięków, wytrzymałości resztkowej, odkształceń, masy i obrazu mikrospektań. Dla ekspozycji z solami odladzającymi istotne jest badanie powierzchniowego złuszczenia według ujednoliconej procedury, np. CEN/TS 12390-9 (CEN, 2016). Beton może bowiem zachować względnie dobrą integralność wewnętrzną, a jednocześnie wykazywać nieakceptowalne uszkodzenia warstwy powierzchniowej.

Szczególnie mało danych dotyczy mrozoodporności betonu z kruszywem drugiej i dalszych generacji. Dostępne prace o zamkniętym obiegu koncentrowały się głównie na właściwościach fizycznych i mechanicznych (Marie i Quiasrawi, 2012). Dlatego wniosek o systematycznym pogarszaniu mrozoodporności z każdym cyklem należy traktować jako uzasadnioną hipotezę mechanistyczną, a nie ustalone prawo. Do jej weryfikacji potrzebne są serie, w których wszystkie generacje powstają z kontrolowanego betonu macierzystego, mają jednakową objętość zaczynu, taki sam efektywny w/b, porównywalny system napowietrzenia oraz identyczny stopień nasycenia przed badaniem.

6. Karbonatyzacja

Karbonatyzacja polega na reakcji dwutlenku węgla z produktami hydratacji cementu, prowadzącej do obniżenia pH roztworu porowego. W konstrukcjach żelbetowych zasadniczym skutkiem jest utrata warunków pasywacji zbrojenia po dotarciu frontu karbonatyzacji do stali. Szybkość procesu zależy od stężenia CO₂, wilgotności względnej, temperatury, zawartości faz alkalicznych, stopnia hydratacji i oporu transportowego betonu. Najszybszy rozwój zwykle występuje przy wilgotności pośredniej: zbyt suche pory ograniczają rozpuszczanie CO₂, natomiast pełne nasycenie utrudnia jego dyfuzję gazową.

Kruszywo recyklingowe może zwiększać głębokość karbonatyzacji przez wprowadzenie porowatej zaprawy i dodatkowych stref przejściowych. Otsuki i współautorzy (2003) wykazali związek pomiędzy jakością kruszywa recyklingowego, mikrostrukturą strefy przejściowej, karbonatyzacją i penetracją chlorków. Levy i Helene (2004) stwierdzili, że odpowiednio zaprojektowany beton z kruszywem recyklingowym może osiągać zadowalającą trwałość, ale przy wysokich poziomach zastąpienia i mniej korzystnym składzie karbonatyzacja może przyspieszać. Podobne zależności od jakości materiału, udziału kruszywa i w/c obserwowano w kolejnych badaniach (Evangelista i de Brito, 2010; Thomas et al., 2013; Bravo et al., 2015; Kou i Poon, 2012; Kou et al., 2011).

Wpływ wielokrotnego recyklingu jest bardziej złożony niż prosty wzrost porowatości. Stara zaprawa może być częściowo skarbonatyzowana jeszcze przed ponownym użyciem. Z jednej strony zmniejsza to jej rezerwę alkaliczną, z drugiej karbonatyzacja może uszczelniać część porów przez wytrącanie węglanu wapnia. Jeżeli jednak skarbonatyzowana zaprawa jest spękana i połączona z nową matrycą przez słabą strefę przejściową, efekt transportowy może dominować nad lokalnym uszczelnieniem. W kolejnych generacjach współistnieją więc obszary o różnym stopniu karbonatyzacji, wieku i składzie, co utrudnia interpretację pojedynczego pomiaru głębokości frontu.

Dodatki mineralne stanowią ważne narzędzie modyfikacji. Popiół lotny, żużel i pył krzemionkowy mogą zmniejszać przepuszczalność dzięki reakcji pucolanowej lub utajonej hydraulicznej i rafinacji struktury porów. Jednocześnie zużywają część portlandytu oraz mogą zmniejszać całkowitą rezerwę alkaliczną, dlatego ich wpływ na karbonatyzację nie jest identyczny z wpływem na chlorki. Kou, Poon i Agrela wykazali, że dodatki mineralne poprawiają część właściwości transportowych betonów z kruszywem recyklingowym, lecz ocena musi uwzględniać konkretny mechanizm ekspozycji (Kou et al., 2011). Nie jest zatem zasadne automatyczne uznawanie każdej redukcji przepuszczalności za równoważną poprawę odporności na karbonatyzację.

Badania przyspieszone, prowadzone przy podwyższonym stężeniu CO₂, są użyteczne do porównywania mieszanek, ale nie odwzorowują wprost naturalnej kinetyki i zmian wilgotności. Norma EN 12390-12 porządkuje przyspieszoną metodę badania odporności na karbonatyzację (CEN, 2020). Dla betonów wielokrotnie recyklingowanych konieczne jest jednak dodatkowe określenie początkowego stopnia karbonatyzacji kruszywa, warunków jego przechowywania oraz wilgotności przed mieszaniem. Bez tych danych możliwe jest przypisanie liczbie cykli efektu, który w rzeczywistości wynika z różnego starzenia materiału.

7. Penetracja chlorków

Chlorki mogą pochodzić z wody morskiej, aerozolu morskiego lub soli odladzających. Ich obecność w strefie zbrojenia może prowadzić do lokalnego przerwania warstwy pasywnej i korozji wżerowej. Transport odbywa się przez dyfuzję, absorpcję kapilarną, migrację w polu elektrycznym oraz przepływ roztworu. W warunkach rzeczywistych mechanizmy te nakładają się i zależą od cykli zwilżania–wysychania, temperatury, rys oraz zdolności matrycy do chemicznego i fizycznego wiązania chlorków.

W betonach z kruszywem recyklingowym większa sorpcyjność i udział stref przejściowych często zwiększają szybkość wnikania chlorków. Otsuki i współautorzy (2003) wykazali, że jakość kruszywa i strefy przejściowej wpływa na penetrację chlorków. Thomas i współautorzy (2013), analizując kilka wskaźników trwałości, potwierdzili, że wzrost udziału kruszywa może obniżać odporność transportową, lecz skala efektu jest zależna od jakości betonu i sposobu projektowania. Bravo i współautorzy (2015) zwrócili uwagę na duże znaczenie źródła oraz składu kruszywa pochodzącego z zakładów przetwarzania odpadów.

Niekorzystny wpływ może zostać ograniczony przez obniżenie w/b, zastosowanie dodatków mineralnych, odpowiednią pielęgnację oraz poprawę strefy przejściowej. Kou i Poon (2012) uzyskali poprawę właściwości trwałościowych przez optymalizację składu betonów z grubym kruszywem recyklingowym. Z kolei porównanie mieszanek z dodatkami mineralnymi pokazało, że rafinacja struktury porów może znacząco ograniczać transport

jonów (Kou et al., 2011). Należy jednak odróżnić całkowitą zawartość chlorków od frakcji wolnej. Stara zaprawa w kruszywie zwiększa ilość faz cementowych zdolnych do adsorpcji i wiązania chlorków, co w pewnych warunkach może zmniejszać stężenie wolnych jonów. Równocześnie jej większa porowatość przyspiesza ich dopływ. Wynik netto zależy więc od składu cementu, stopnia karbonatyzacji i historii wilgotnościowej.

Wielokrotny recykling może nasilać transport chlorków przez kumulację zaprawy i mikropęknięć. Szczególnie istotna jest karbonatyzacja starszych warstw, ponieważ może uwalniać wcześniej związane chlorki i zmieniać pojemność sorpcyjną. Ponadto uszkodzenia mrozowe zwiększają łączność rys, a następnie przyspieszają penetrację roztworu soli. Z tego względu badanie chlorków w materiale nieuszkodzonym nie jest wystarczające do oceny konstrukcji eksploatowanej w klimacie, w którym występuje jednocześnie mróz i odladzanie.

Do szybkiej oceny porównawczej powszechnie stosuje się badania migracyjne, w tym procedurę NT BUILD 492 (Nordtest, 1999). Wynik w postaci współczynnika migracji nie jest tożsamy ze współczynnikiem dyfuzji w warunkach naturalnych, ale dobrze nadaje się do porównywania serii o podobnym składzie. Dla materiałów wielofazowych warto równolegle oznaczać sorpcyjność, rezystywność, profil chlorków po ekspozycji dyfuzyjnej oraz rozkład wilgotności. Pozwala to rozdzielić wpływ transportu kapilarnego, przewodnictwa jonowego i zdolności wiązania.

8. Współdziałanie oddziaływań i metody poprawy trwałości

Konstrukcje rzadko są narażone na pojedynczy mechanizm degradacji. Elementy mostowe i nawierzchnie mogą podlegać cyklom zamrażania i rozmrażania w obecności chlorków, a strefy okresowo suche – jednoczesnej karbonatyzacji. Uszkodzenia mrozowe zwiększają powierzchnię i łączność rys, przyspieszając następnie wnikanie CO₂ i roztworów chlorkowych. Karbonatyzacja zmienia skład fazowy zaczynu i zdolność wiązania chlorków, natomiast krystalizacja soli oraz korozja zbrojenia generują dalsze naprężenia. W betonie wielokrotnie recyklingowanym efekty te mogą rozwijać się w sieci starych i nowych stref przejściowych.

Pierwszą metodą ograniczania ryzyka jest selektywne pozyskiwanie materiału. Kruszywo z jednorodnych prefabrykatów lub kontrolowanych betonów laboratoryjnych daje bardziej przewidywalne wyniki niż mieszanina odpadów. Etxeberria i współautorzy (2007) wykazali znaczenie procesu produkcji oraz udziału kruszywa, a badania kruszywa z odrzutów prefabrykacji potwierdziły, że wysokiej jakości źródło może umożliwiać uzyskanie dobrych właściwości mechanicznych i trwałościowych (Soares et al., 2014). W zamkniętym obiegu warto zatem projektować beton również pod kątem przyszłej recyklowalności i zachowania informacji o jego składzie.

Drugą grupą działań jest uszlachetnianie kruszywa. Stosuje się dodatkowe kruszenie, ścieranie, separację, płukanie, obróbkę cieplną lub chemiczną oraz technologie pozwalające skuteczniej oddzielać starą zaprawę. Lotfi i współautorzy (2014) wykazali, że zaawansowany proces recyklingu może poprawiać jakość kruszywa i właściwości nowego betonu. Należy jednak oceniać bilans środowiskowy: intensywne usuwanie zaprawy wymaga energii i może generować drobne odpady, dlatego nie zawsze jest korzystniejsze od wykorzystania umiarkowanego udziału nieoczyszczonego kruszywa.

Trzecią grupą jest modyfikacja technologii mieszania. Dwustopniowe mieszanie może poprawiać otoczenie ziaren zaczynem i ograniczać lokalne nieciągłości w strefie przejściowej (Tam et al., 2005). Wstępne nawilżanie stabilizuje urabialność, ale powinno być kontrolowane na podstawie kinetyki absorpcji, a nie wyłącznie 24-godzinnej nasiąkliwości. W betonach mrozoodpornych konieczne jest jednoczesne zaprojektowanie systemu porów powietrznych. W każdym przypadku należy posługiwać się efektywną ilością wody w nowym zaczynie.

Najbardziej uniwersalną metodą pozostaje ograniczenie przepuszczalności nowej matrycy przez odpowiednio niski w/b, właściwą pielęgnację i racjonalne zastosowanie dodatków mineralnych. Dodatki te są szczególnie skuteczne w ograniczaniu transportu chlorków, ale ich wpływ na karbonatyzację wymaga osobnej oceny. Projektowanie powinno być wielokryterialne: receptura zoptymalizowana wyłącznie pod wytrzymałość lub pojedynczy test migracji może nie zapewnić mrozoodporności ani odpowiedniej rezerwy alkalicznej.

Tabela 1. Synteza wpływu cech materiału na analizowane mechanizmy trwałości

Cecha materiału	Mrozoodporność	Karbonatyzacja	Chlorki	Znaczenie w kolejnych cyklach
Większa nasiąkliwość i zaprawa przyczepiona	większy stopień nasycenia i ryzyko ciśnień mrozowych	łatwiejszy transport CO ₂ , lecz możliwe lokalne uszczelnienie po karbonatyzacji	większa sorpcja i transport roztworu; jednocześnie możliwość wiązania części chlorków	zwykle narasta udział fazy zaprawowej
Mikropęknięcia po kruszeniu	inicjacja i propagacja uszkodzeń	skrócenie drogi dyfuzji gazu	preferencyjne drogi migracji jonów	mogą kumulować się podczas kolejnych rozbiórek
Niski efektywny w/b nowej matrycy	zwiększa wytrzymałość i ogranicza transport wody	zmniejsza szybkość transportu CO ₂	wyraźnie ogranicza migrację i dyfuzję	może kompensować część pogorszenia kruszywa
Napowietrzenie	kluczowa poprawa odporności przy odpowiednim układzie porów	zwykle drugorzędny wpływ	może zwiększać porowatość całkowitą, ale nie musi zwiększać transportu kapilarnego	wymaga kontroli ze względu na wodę magazynowaną w kruszywie
Dodatki mineralne	wpływ zależny od dojrzałości i nasycenia	uszczelnienie porów, lecz mniejsza rezerwa alkaliczna	zwykle silna poprawa odporności na transport chlorków	powinny być dobierane do dominującej klasy ekspozycji

9. Luki badawcze i proponowany kierunek dalszych badań

Najważniejszą luką jest brak długich, porównywalnych serii obejmujących trzy lub więcej rzeczywistych cykli beton–kruszywo–beton. Większość publikacji dotyczy pierwszej generacji kruszywa, a nieliczne badania zamkniętego obiegu skupiają się głównie na wytrzymałości i podstawowych cechach fizycznych (Marie i Quiasrawi, 2012). W konsekwencji nie ma obecnie wystarczających podstaw do określenia dopuszczalnej liczby cykli recyklingu dla poszczególnych klas ekspozycji.

Program badań powinien rozpoczynać się od betonu referencyjnego o dokładnie znanym składzie. Po ustalonym okresie dojrzewania próbki należy kruszyć w kontrolowanych warunkach, wydzielać te same frakcje i stosować stały poziom zastąpienia w kolejnej generacji. Należy rozważyć dwa warianty projektowania: stały skład nominalny, pokazujący naturalną kumulację zmian, oraz stałe właściwości użytkowe, w którym koryguje się zaczyn i dodatki, aby utrzymać porównywalną konsystencję, wytrzymałość i zawartość powietrza. Rozdzielenie tych wariantów pozwoli odpowiedzieć, czy pogorszenie wynika z samego materiału, czy z braku adaptacji receptury.

Dla każdej generacji kruszywa konieczne jest oznaczenie gęstości, nasiąkliwości w funkcji czasu, zawartości zaprawy, odporności na rozdrabnianie, składu ziarnowego, kształtu i stopnia mikrospękania. W betonie należy równolegle badać wytrzymałość, moduł sprężystości, sorpcyjność, przepuszczalność, rezystywność oraz strukturę porów. Badania mikrostrukturalne powinny identyfikować stare i nowe strefy przejściowe, a nie ograniczać się do losowych obrazów SEM. Przydatna może być mikrotomografia rentgenowska, która umożliwi śledzenie rozwoju rys w tych samych próbkach.

Program mrozowy powinien obejmować różne poziomy nasycenia i ekspozycję zarówno w wodzie, jak i w roztworze soli. Oprócz ubytku masy należy monitorować dynamiczny moduł sprężystości, odkształcenia i wytrzymałość resztkową. Badania karbonatyzacji powinny porównywać ekspozycję naturalną i przyspieszoną zgodnie z EN 12390-12 (CEN, 2020), przy wcześniejszym określeniu stopnia karbonatyzacji samego kruszywa. W zakresie chlorków należy łączyć szybki test migracyjny (Nordtest, 1999) z długotrwałą dyfuzją, profilami stężenia i oznaczeniem chlorków wolnych oraz całkowitych.

Niezbędne są eksperymenty sekwencyjne i złożone. Przykładowo próbki po kontrolowanej liczbie cykli mrozowych powinny być następnie poddawane penetracji chlorków, a inne serie – karbonatyzacji przed ekspozycją chlorkową. Pozwoli to ocenić, czy w wielokrotnie recyklingowanym betonie występuje efekt synergiczny większy niż suma oddziaływań badanych osobno. Takie dane są konieczne do tworzenia modeli okresu inicjacji korozji zgodnych z podejściem projektowania trwałości (fib, 2006).

Dalszy kierunek obejmuje modele predykcyjne. Liczba cykli recyklingu powinna być jedną ze zmiennych, ale nie jedyną. Model powinien uwzględniać właściwości betonu macierzystego, udział zaprawy, nasiąkliwość, udział kruszywa, efektywny w/b, zawartość powietrza, rodzaj spoiwa, warunki pielęgnacji i parametry ekspozycji. Ze względu na ograniczoną liczbę danych zastosowanie sztucznej inteligencji powinno być poprzedzone budową otwartej, ujednoliconej bazy wyników i analizą niepewności. Modele czysto statystyczne, trenowane na niewielkich i heterogenicznych zbiorach, mogą pozornie osiągać wysoką dokładność, ale nie zapewnią wiarygodnej ekstrapolacji na dalsze generacje.

Ostatecznym celem powinno być opracowanie kryteriów użytkowych dla kruszywa wielokrotnie recyklingowanego. Zamiast sztywnego zakazu stosowania po określonej liczbie cykli bardziej racjonalna może być klasyfikacja oparta na nasiąkliwości, gęstości, zawartości zaprawy, odporności na rozdrabnianie i wynikach testów transportowych. Pozwoliłoby to stosować wysokiej jakości materiał z kolejnych generacji tam, gdzie spełnia wymagania, oraz kierować gorsze frakcje do mniej wymagających zastosowań.

10. Wnioski

Przeprowadzony przegląd potwierdza, że wielokrotny recykling betonu jest rozwiązaniem technicznie wykonalnym i zgodnym z założeniami gospodarki o obiegu zamkniętym, jednak każda kolejna generacja materiału staje się bardziej złożonym układem kompozytowym. W ziarnach kruszywa kumulują się warstwy starej zaprawy, strefy przejściowe powstałe w różnych cyklach oraz mikropęknięcia związane z eksploatacją, rozbiórką i kruszeniem. Zmiany te najczęściej prowadzą do obniżenia gęstości oraz zwiększenia nasiąkliwości i porowatości kruszywa. Nie można jednak przyjąć, że pogorszenie właściwości przebiega liniowo wraz z numerem generacji. Ostateczny efekt zależy od jakości betonu macierzystego, wartości współczynnika wodno-spoiwowego, sposobu pielęgnacji, udziału kruszywa recyklingowego, technologii jego rozdrabniania i oczyszczania oraz sposobu kompensacji wody w mieszanke.

Najbardziej prawdopodobnym następstwem kolejnych cykli recyklingu jest zwiększenie podatności betonu na transport wody, gazów i jonów. Porowata zaprawa przyczepiona do ziaren oraz rozbudowana sieć starych i nowych stref przejściowych mogą tworzyć preferencyjne drogi migracji wilgoci, dwutlenku węgla i chlorków. Mechanizm ten jest dobrze udokumentowany w badaniach betonów z kruszywem po pierwszym cyklu recyklingu, natomiast liczba bezpośrednich badań trzeciej i dalszych generacji pozostaje niewystarczająca. Z tego względu nie ma obecnie podstaw do sformułowania uniwersalnej zależności liczbowej między liczbą cykli a spadkiem trwałości. Numer generacji nie powinien być zatem traktowany jako samodzielne kryterium przydatności materiału; większe znaczenie mają mierzalne cechy kruszywa i betonu, takie jak nasiąkliwość, zawartość zaprawy, struktura porów, rezystywność, sorpcyjność i przepuszczalność.

W odniesieniu do mrozoodporności kluczowe znaczenie ma stopień nasycenia materiału wodą, jakość systemu porów powietrznych oraz efektywny współczynnik wodno-spoiwowy nowej matrycy. Zwiększona nasiąkliwość kruszywa wielokrotnie recyklingowanego może podnosić ilość wody dostępnej do zamarzania i zwiększać ryzyko rozwoju ciśnień wewnętrznych. Nie oznacza to jednak automatycznej utraty odporności mrozowej. Prawidłowe napowietrzenie, ograniczenie efektywnego w/b, odpowiednie zagęszczenie i pielęgnacja oraz kontrolowane przygotowanie wilgotnościowe kruszywa mogą w znacznym stopniu kompensować jego mniej korzystne właściwości. Ocena mrozoodporności nie powinna ograniczać się do ubytku masy, lecz obejmować również zmiany dynamicznego modułu sprężystości, wytrzymałości resztkowej, odkształceń i obrazu mikrospektań, zwłaszcza w warunkach działania soli odladzających.

Karbonatyzacja betonów z kruszywem wielokrotnie recyklingowanym może przebiegać szybciej wskutek bardziej otwartej mikrostruktury i obecności wcześniej skarbonatyzowanych warstw zaprawy, które mają ograniczoną rezerwę alkaliczną.

Jednocześnie lokalne produkty karbonatyzacji mogą częściowo uszczelniać pory, dlatego wpływ tego procesu nie jest jednoznaczny i powinien być analizowany z uwzględnieniem historii materiału. Podobnie złożony charakter ma oddziaływanie dodatków mineralnych: ich zastosowanie zwykle ogranicza transport CO₂ dzięki rafinacji struktury porów, lecz może również zmniejszać ilość faz alkalicznych zdolnych do neutralizacji dwutlenku węgla. Wiarygodna ocena wymaga zatem równoczesnego określania głębokości karbonatyzacji, porowatości, przepuszczalności i składu fazowego, a wyniki ekspozycji przyspieszonej powinny być porównywane z obserwacjami prowadzonymi w warunkach naturalnych.

Odporność na działanie chlorków jest determinowana przez konkurencję pomiędzy szybkością transportu jonów a zdolnością matrycy do ich fizycznego i chemicznego wiązania. Większa sorpcyjność, mikropęknięcia i ciągłość stref przejściowych mogą przyspieszać wnikanie roztworów chlorkowych, natomiast zwiększona ilość starej zaprawy może w określonych warunkach wiązać część jonów i ograniczać ich frakcję wolną. Z tego względu pojedynczy wynik szybkiego testu migracyjnego nie daje pełnej informacji o ryzyku korozji zbrojenia. Ocena powinna obejmować współczynnik migracji lub dyfuzji, profile stężenia, rezystywność, sorpcyjność oraz rozróżnienie chlorków całkowitych i wolnych. Szczególnie istotne są badania ekspozycji złożonych, ponieważ uszkodzenia mrozowe i karbonatyzacja mogą istotnie zmieniać późniejszy transport chlorków.

Bezpieczne wykorzystanie betonu z kruszywem wielokrotnie recyklingowanym wymaga przejścia od prostych ograniczeń recepturowych do podejścia użytkowego, opartego na wymaganej trwałości w konkretnej klasie ekspozycji. Priorytetem badawczym powinny być kontrolowane serie obejmujące co najmniej trzy lub cztery pełne cykle beton–kruszywo–beton, przy zachowaniu identyfikowalności materiału oraz równoległej analizie cech mechanicznych, transportowych i mikrostrukturalnych. Konieczne jest także porównywanie ekspozycji pojedynczych, sekwencyjnych i jednoczesnych, a następnie budowa otwartych baz danych umożliwiających rozwój modeli predykcyjnych. Modele te powinny uwzględniać rzeczywiste parametry kruszywa i matrycy, a nie wyłącznie numer generacji. Takie podejście może doprowadzić do opracowania kryteriów klasyfikacji materiału, podstaw normalizacyjnych oraz zasad jego racjonalnego stosowania w konstrukcjach o zdefiniowanym okresie użytkowania.

Bibliografia:

1. Behera, M., Bhattacharyya, S. K., Minocha, A. K., Deoliya, R., & Maiti, S. (2014). Recycled aggregate from C&D waste and its use in concrete - A breakthrough towards sustainability in construction sector: A review. *Construction and Building Materials*, 68, 501-516. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.07.003>
2. Bravo, M., de Brito, J., Pontes, J., & Evangelista, L. (2015). Durability performance of concrete with recycled aggregates from construction and demolition waste plants. *Construction and Building Materials*, 77, 357-369. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.12.103>
3. CEN. (2016). CEN/TS 12390-9:2016. Testing hardened concrete - Part 9: Freeze-thaw resistance with de-icing salts - Scaling. European Committee for Standardization, Brussels.

4. CEN. (2020). EN 12390-12:2020. Testing hardened concrete - Part 12: Determination of the carbonation resistance of concrete - Accelerated carbonation method. European Committee for Standardization, Brussels.
5. CEN. (2021). EN 206:2013+A2:2021. Concrete - Specification, performance, production and conformity. European Committee for Standardization, Brussels.
6. de Brito, J., & Saikia, N. (2013). *Recycled Aggregate in Concrete: Use of Industrial, Construction and Demolition Waste*. Springer, London. <https://doi.org/10.1007/978-1-4471-4540-0>
7. European Commission. (2020). A New Circular Economy Action Plan: For a Cleaner and More Competitive Europe. COM(2020) 98 final, Brussels. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=COM:2020:98:FIN>
8. Evangelista, L., & de Brito, J. (2010). Durability performance of concrete made with fine recycled concrete aggregates. *Cement and Concrete Composites*, 32, 9-14. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2009.09.005>
9. Etxeberria, M., Vázquez, E., Marí, A., & Barra, M. (2007). Influence of amount of recycled coarse aggregates and production process on properties of recycled aggregate concrete. *Cement and Concrete Research*, 37, 735-742. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2007.02.002>
10. fib. (2006). *fib Bulletin 34: Model Code for Service Life Design*. International Federation for Structural Concrete, Lausanne.
11. Katz, A. (2003). Properties of concrete made with recycled aggregate from partially hydrated old concrete. *Cement and Concrete Research*, 33, 703-711. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(02\)01033-5](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(02)01033-5)
12. Kou, S. C., Poon, C. S., & Agrela, F. (2011). Comparisons of natural and recycled aggregate concretes prepared with the addition of different mineral admixtures. *Cement and Concrete Composites*, 33, 788-795. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2011.05.009>
13. Kou, S. C., & Poon, C. S. (2012). Enhancing the durability properties of concrete prepared with coarse recycled aggregate. *Construction and Building Materials*, 35, 69-76. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.02.032>
14. Levy, S. M., & Helene, P. (2004). Durability of recycled aggregates concrete: A safe way to sustainable development. *Cement and Concrete Research*, 34, 1975-1980. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2004.02.009>
15. Lotfi, S., Deja, J., Rem, P., Mróz, R., van Roekel, E., & van der Stelt, H. (2014). Mechanical recycling of EOL concrete into high-grade aggregates. *Resources, Conservation and Recycling*, 87, 117-125. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2014.03.010>
16. Marie, I., & Quiasrawi, H. (2012). Closed-loop recycling of recycled concrete aggregates. *Journal of Cleaner Production*, 37, 243-248. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2012.07.020>
17. McNeil, K., & Kang, T. H.-K. (2013). Recycled concrete aggregates: A review. *International Journal of Concrete Structures and Materials*, 7, 61-69. <https://doi.org/10.1007/s40069-013-0032-5>
18. Nordtest. (1999). NT BUILD 492. Concrete, mortar and cement-based repair materials: Chloride migration coefficient from non-steady-state migration experiments.

19. Otsuki, N., Miyazato, S., & Yodsudjai, W. (2003). Influence of recycled aggregate on interfacial transition zone, strength, chloride penetration and carbonation of concrete. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 15(5), 443-451. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0899-1561\(2003\)15:5\(443\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0899-1561(2003)15:5(443))
20. Poon, C. S., Shui, Z. H., Lam, L., Fok, H., & Kou, S. C. (2004). Influence of moisture states of natural and recycled aggregates on the slump and compressive strength of concrete. *Cement and Concrete Research*, 34, 31-36. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(03\)00186-8](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(03)00186-8)
21. Richardson, A., Coventry, K., & Bacon, J. (2011). Freeze/thaw durability of concrete with recycled demolition aggregate compared to virgin aggregate concrete. *Journal of Cleaner Production*, 19, 272-277. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2010.09.014>
22. Silva, R. V., de Brito, J., & Dhir, R. K. (2014). Properties and composition of recycled aggregates from construction and demolition waste suitable for concrete production. *Construction and Building Materials*, 65, 201-217. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.04.117>
23. Soares, D., de Brito, J., Ferreira, J., & Pacheco, J. (2014). Use of coarse recycled aggregates from precast concrete rejects: Mechanical and durability performance. *Construction and Building Materials*, 71, 263-272. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.08.034>
24. Tam, V. W. Y., Gao, X. F., & Tam, C. M. (2005). Microstructural analysis of recycled aggregate concrete produced from two-stage mixing approach. *Cement and Concrete Research*, 35, 1195-1203. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2004.10.025>
25. Thomas, C., Setién, J., Polanco, J. A., Alaejos, P., & Sánchez de Juan, M. (2013). Durability of recycled aggregate concrete. *Construction and Building Materials*, 40, 1054-1065. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.11.106>
26. Tuyan, M., Mardani-Aghabaglou, A., & Ramyar, K. (2014). Freeze-thaw resistance, mechanical and transport properties of self-consolidating concrete incorporating coarse recycled concrete aggregate. *Materials & Design*, 53, 983-991. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2013.07.100>
27. Xiao, J., Li, W., Fan, Y., & Huang, X. (2012). An overview of study on recycled aggregate concrete in China (1996-2011). *Construction and Building Materials*, 31, 364-383. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.12.074>

6. NISKONAKŁADOWA WYRZUTNIA ELEKTROMAGNETYCZNA TYPU COILGUN JAKO ŹRÓDŁO UDERZEŃ O BARDZO NISKIEJ ENERGII KINETYCZNEJ

Tomasz Makowski

Politechnika Krakowska im. Tadeusza Kościuszki

Wydział Inżynierii Elektrycznej i Komputerowej

Katedra Infotroniki i Cyberbezpieczeństwa

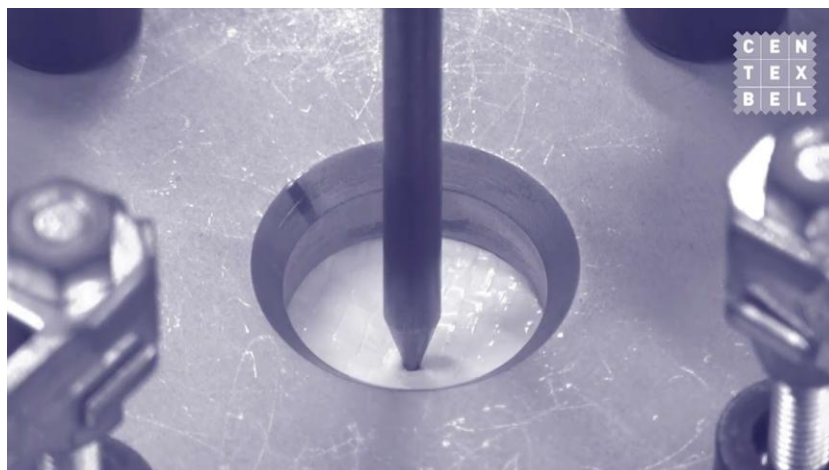
ul. Warszawska 24, 31-155 Kraków

E-mail: tomasz.makowski@pk.edu.pl

1. Wstęp

Badania odporności materiałów na przebicie, określane w literaturze jako badania igłoodporności (ang. puncture resistance), stanowią ważny element oceny bezpieczeństwa i funkcjonalności wielu grup materiałów. Dotyczy to zwłaszcza tkanin ochronnych, rękawic roboczych, opakowań medycznych, membran, folii technicznych oraz wybranych biomateriałów. W warunkach rzeczywistych materiały te mogą być narażone na kontakt z ostrymi obiektami, takimi jak igły, szpikulce, odłamki czy krawędzie narzędzi. Znaczenie tego rodzaju badań wzrasta wraz z rozwojem materiałów o coraz cieńszych przekrojach i coraz wyższych wymaganiach użytkowych, szczególnie w sektorze medycznym, ochronie osobistej oraz przemyśle opakowań sterylnych.

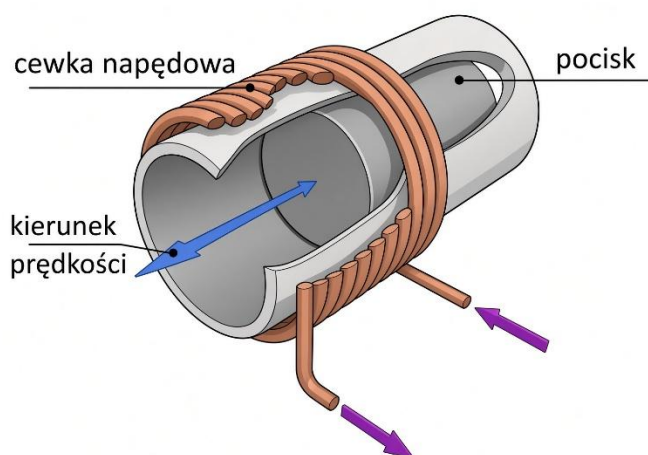
Podstawowymi normami regulującymi badania igłoodporności są ASTM F1342 (Standard Test Method for Protective Clothing Material Resistance to Puncture) oraz ISO 13996 (Protective clothing – Mechanical properties – Determination of resistance to puncture) [ASTM F1342, 201; ISO 13996, 1999]. Oba dokumenty opisują procedury quasi-statycznego przebijania próbki z wykorzystaniem zdefiniowanego elementu pomiarowego. Przykład przebiegu takiego testu przedstawiono na rys. 1. Norma ASTM F1342 przewiduje zastosowanie penetrometru o określonej geometrii i prędkości przemieszczania, natomiast ISO 13996 koncentruje się na wyznaczaniu siły przebicia. Równolegle rozwija się obszar badań typu low-velocity impact, obejmujących uderzenia o energiach mieszczących się zazwyczaj w przedziale 0,1–10 J. W tym zakresie analizuje się uszkodzenia materiałów kompozytowych, polimerów, struktur warstwowych oraz tkanin technicznych [Shergold i Fleck, 2004; Tatarek i in., 2021].



Rysunek 1. Przykład testu penetracji materiału igłą w warunkach laboratoryjnych [Centexbel, 2025]

Klasyczne metody generowania uderzeń o niskiej energii, takie jak drop test (test spadającego ciężarka) oraz badania z wykorzystaniem uniwersalnych maszyn wytrzymałościowych, mają istotne ograniczenia. Test spadającego ciężarka nie zawsze zapewnia precyzyjną kontrolę energii przy bardzo niskich jej wartościach, natomiast maszyny uniwersalne generują zazwyczaj obciążenie quasi-statyczne, które nie odzwierciedla w pełni dynamiki rzeczywistego uderzenia. Ponadto profesjonalne stanowiska laboratoryjne są kosztowne i nie zawsze dostępne w jednostkach dysponujących ograniczonym budżetem badawczym. Z tego względu poszukuje się alternatywnych, niskokosztowych źródeł kontrolowanych impulsów energetycznych, które mogłyby znaleźć zastosowanie we wstępnych badaniach penetracji materiałów.

Jednym z rozwiązań spełniających powyższe kryteria są wyrzutnie elektromagnetyczne typu cewkowego (coilgun). Działanie jednostopniowego coilguna opiera się na zjawisku reluktancji magnetycznej. Przepływ prądu przez cewkę generuje niejednorodne pole magnetyczne, którego natężenie jest największe w środku uzwojenia. Ferromagnetyczny pocisk, umieszczony w obszarze gradientu tego pola, doznaje siły skierowanej ku obszarowi o mniejszej reluktancji, czyli w kierunku środka cewki. W rezultacie pocisk zostaje wciągnięty do wnętrza uzwojenia i przyspieszony wzdłuż osi lufy (schemat ideowy przedstawiono na rys. 2). Kluczowym problemem konstrukcyjnym jest konieczność rozłączenia obwodu prądowego w chwili, gdy pocisk mija środek cewki; w przeciwnym razie pojawia się siła hamująca, istotnie obniżająca sprawność układu. Proste konstrukcje typu DIY, pozbawione precyzyjnego układu synchronizacji, charakteryzują się sprawnością od ułamka procenta do kilku procent. Mimo niskiej sprawności układy te oferują połączenie niskiego kosztu, prostoty wykonania oraz możliwości generowania powtarzalnych impulsów o kontrolowanej energii [Einat i Orbach, 2023].



Rysunek 2. Zasada działania wyrzutni elektromagnetycznej typu coilgun [wygenerowany przy użyciu AI]

W literaturze naukowej coilguny były przedmiotem licznych analiz. Publikacja [Camp, 2023] przedstawia badania optymalizacji konfiguracji magazynowania energii w celu maksymalizacji sprawności jednostopniowej wyrzutni elektromagnetycznej, uzyskując sprawność przekraczającą 14% w układzie bez chłodzenia. Z kolei [Chen i in., 2024] przedstawili metody poprawy sprawności poprzez zastosowanie bipolarnych impulsów prądowych, niejednorodnego uzwojenia cewki oraz pocisków z magnesów trwałych. W Polsce zagadnienie wyrzutni elektromagnetycznych rozwijane jest m.in. na Politechnice Krakowskiej, gdzie zaprojektowano stanowisko laboratoryjne ze sterownikiem PLC do badania coilguna z magnesem trwałym jako pociskiem [Święcicka i in., 2024], oraz na Politechnice Śląskiej, gdzie analizowano wpływ kąta uderzenia pocisku wystrzelonego z wyrzutni na uszkodzenia paneli kompozytowych [Tatarek i in., 2021]. Prace te wskazują na rosnące zainteresowanie wykorzystaniem wyrzutni elektromagnetycznych nie tylko w zastosowaniach militarnych i edukacyjnych, lecz także w badaniach materiałowych.

Celem niniejszej pracy była ocena możliwości wykorzystania taniego, komercyjnego zestawu elektromagnetycznego HU-064 jako źródła uderzeń o bardzo niskiej energii kinetycznej, przeznaczonych do wstępnych badań penetracji materiałów. Praca obejmuje charakterystykę energetyczną urządzenia, pomiary prędkości pocisku przy maksymalnym napięciu 91 V, ocenę sprawności układu oraz omówienie potencjalnych zastosowań i ograniczeń badanego rozwiązania. Badania miały charakter wstępny i nie obejmowały bezpośrednich testów penetracji materiałów; koncentrowały się natomiast na charakterystyce energetycznej źródła uderzeń jako podstawie do dalszych prac badawczych.

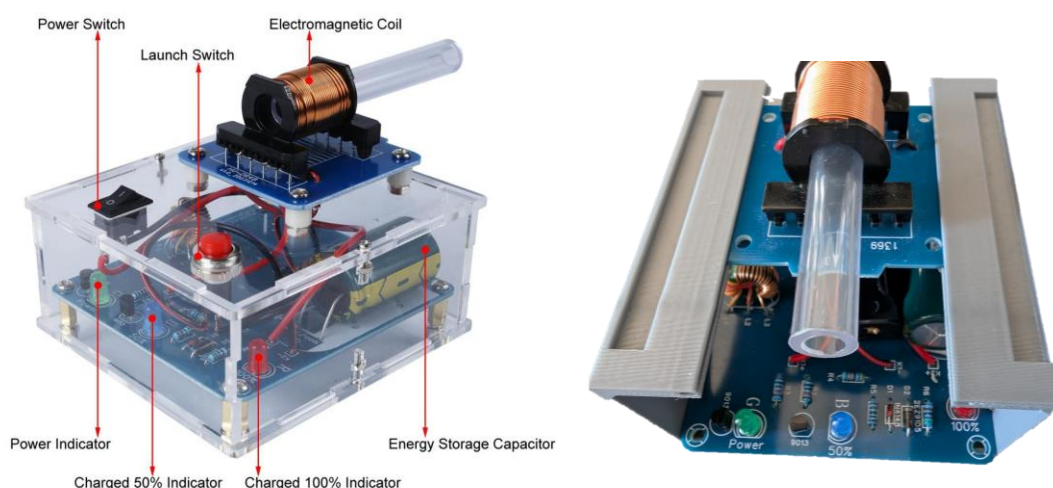
2. Charakterystyka wyrzutni HU-064

W badaniach wykorzystano jednostopniowy zestaw elektromagnetyczny HU-064 typu coilgun, dostępny komercyjnie jako zestaw edukacyjno-hobbystyczny (rys. 3). Układ zasilany jest napięciem stałym o wartości 3 V DC, pochodzącym z dwóch baterii typu AA. Głównym elementem magazynującym energię jest kondensator elektrolityczny o pojemności $C = 1000 \mu\text{F}$ i napięciu znamionowym 100 V. Maksymalne napięcie pracy, ograniczone diodą Zenera typu 2EZ91D5, wynosi $U = 91 \text{ V}$. Energia zgromadzona w kondensatorze przy

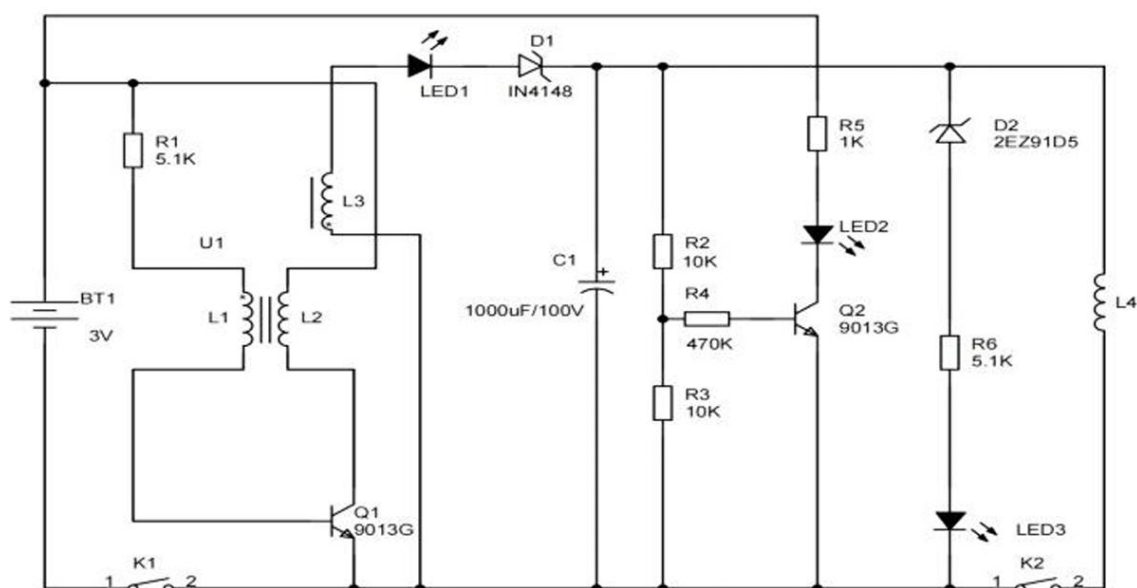
napięciu maksymalnym wynosi:

$$E_C = \frac{1}{2} \cdot C \cdot U^2 = \frac{1}{2} \cdot 0,001 \text{ F} \cdot (91 \text{ V})^2 = 4,14 \text{ J}$$

Cewka napędowa ma konstrukcję jednostopniową. Układ nie jest wyposażony w aktywny system sterowania czasem odłączenia prądu; rozładowanie kondensatora następuje pasywnie, za pośrednictwem elementu przełączającego (czerwonego przycisku). Całkowity koszt urządzenia w momencie zakupu wynosił około 100 zł, co kwalifikuje je jako rozwiązanie niskonakładowe w porównaniu z profesjonalnymi stanowiskami laboratoryjnymi. Zasilanie z baterii 3 V zwiększa bezpieczeństwo użytkowania i eliminuje konieczność stosowania zewnętrznych zasilaczy wysokonapięciowych. Schemat elektryczny układu przedstawiono na rys. 4 [HU-064].



Rysunek 3. Zestaw HU-064: po lewej widok z dokumentacji producenta, po prawej zdjęcie rzeczywistego stanowiska



Rysunek 4. Schemat elektryczny HU-064 [HU-064]

3. Parametry pocisku

Jako pocisk zastosowano walec wykonany ze stali ferromagnetycznej, stanowiący element zestawu HU-064. Wymiary geometryczne pocisku oraz jego masę zestawiono w tabeli 1.

Tabela 1. Parametry geometryczne i masowe pocisku

Parametr	Wartość
Kształt	walec
Materiał	stal ferromagnetyczna
Średnica d	4,0 mm
Długość L	12,0 mm
Masa m	$1,18 \cdot 10^{-3}$ kg

Pocisk umieszczano w cewce w sposób powtarzalny, dążąc do ustandaryzowania jego pozycji początkowej przed każdym strzałem. Wstępne testy wykazały, że nawet niewielkie zmiany położenia pocisku istotnie wpływają na uzyskiwaną prędkość wylotową, co jest charakterystyczne dla prostych konstrukcji coilgunów niewyposażonych w przewodnice ani układy pozycjonujące [Camp, 2023]. Z tego względu w głównej serii pomiarowej szczególną uwagę poświęcono zachowaniu powtarzalności pozycji startowej.

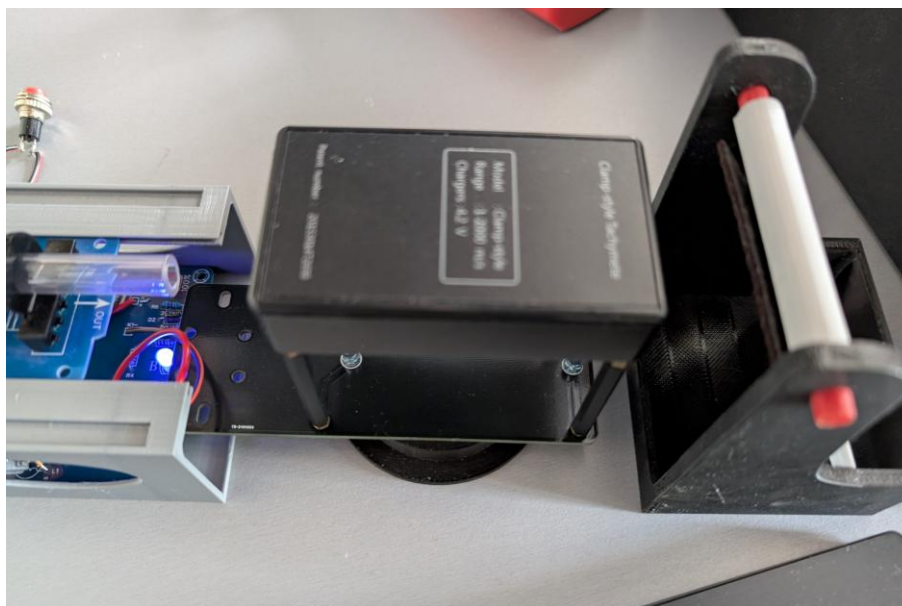
4. Stanowisko pomiarowe

Prędkość wylotową pocisku mierzono za pomocą chronografu optycznego Clamp-style Tachymeter, którego parametry zestawiono w tabeli 2. Zasada działania przyrządu opiera się na pomiarze czasu przelotu pocisku pomiędzy dwiema barierami optycznymi [Clamp-style Tachymeter].

Tabela 2. Parametry chronografu Clamp-style Tachymeter

Parametr	Wartość
Zakres pomiarowy	1–2000 m/s
Dokładność	$\leq 0,1\%$
Rozdzielczość	0,1 m/s
Zasilanie	4,2 V
Typ	optyczny (2 bramki)

Chronograf (rys. 5) montowano bezpośrednio za wylotem cewki, zapewniając stabilne i powtarzalne warunki pomiaru. Przed rozpoczęciem serii pomiarowej sprawdzono poprawność działania przyrządu. Zastosowanie chronografu optycznego wynikało z jego wysokiej rozdzielczości oraz bezkontaktowego charakteru pomiaru, dzięki czemu wyeliminowano wpływ przyrządu na trajektorię pocisku. Za chronografem umieszczono układ wychwytyjący pocisk, co umożliwiało jego bezpieczne zatrzymanie po przejściu przez bramki optyczne.



Rysunek 5. Stanowisko pomiarowe: kit HU-064 z chronografem optycznym Clamp-style Tachymeter

5. Metodyka badań i rachunek niepewności

Główne pomiary przeprowadzono przy maksymalnym dopuszczalnym napięciu 91 V. Wykonano serię 8 strzałów. Dodatkową serię weryfikacyjną przeprowadzono przy napięciu 50 V, aby sprawdzić zgodność wyników z oczekiwaną zależnością prędkości pocisku od napięcia zasilania. Przed każdym strzałem kondensator ładowano do zadanego napięcia, a pocisk umieszczano w ustalonej pozycji początkowej. Odstęp czasowy pomiędzy kolejnymi strzałami umożliwiał pełne naładowanie kondensatora oraz stabilizację układu.

Dla uzyskanych wyników obliczono średnią arytmetyczną, odchylenie standardowe próby oraz niepewność standardową średniej. Niepewność złożoną wyznaczono zgodnie z prawem propagacji niepewności. Energię kinetyczną pocisku oraz sprawność energetyczną układu obliczano odpowiednio ze wzorów:

$$E_K = \frac{1}{2} \cdot m \cdot \bar{v}^2$$

$$\eta = (E_K / E_C) \cdot 100\%$$

Wszystkie obliczenia przeprowadzono z uwzględnieniem niepewności pomiarowych, a wyniki zaokrąglono zgodnie z zasadami rachunku niepewności. Liczbę powtórzeń ($n = 8$) uznano za wystarczającą do wstępnej oceny powtarzalności układu przy zachowaniu stałych warunków początkowych.

6. Wyniki pomiarów prędkości

W serii ośmiu niezależnych pomiarów przy napięciu 91 V uzyskano wartości prędkości zestawione w tabeli 3.

Tabela 3. Wyniki pomiarów prędkości pocisku

Pomiar	Prędkość v_i , m/s
1	5,4
2	5,7
3	5,5
4	5,6
5	5,8
6	5,5
7	5,7
8	5,6
Średnia $\bar{v}$	5,60

Parametry statystyczne wyznaczone na podstawie danych z tabeli 3 przedstawiono poniżej. Średnia arytmetyczna, odchylenie standardowe oraz składowe niepewności wyniosły odpowiednio:

$$\bar{v} = 5,60 \text{ m/s}$$

$$s = 0,13 \text{ m/s}$$

$$u_A = 0,046 \text{ m/s}$$

$$u_B \approx 0,029 \text{ m/s}$$

$$u_C = 0,055 \text{ m/s} \approx 0,06 \text{ m/s}$$

Końcowy wynik pomiaru prędkości, z uwzględnieniem niepewności złożonej, zapisano w następującej postaci:

$$v = (5,60 \pm 0,06) \text{ m/s} \quad (n = 8)$$

Rozrzut wyników był stosunkowo niewielki – współczynnik zmienności wyniósł:

$$CV = (s / \bar{v}) \cdot 100\% \approx 2,3\%$$

Wskazuje to na zadowalającą powtarzalność pomiarów przy zachowaniu stałej pozycji początkowej pocisku. Należy jednak podkreślić, że uzyskiwane wartości prędkości silnie zależą od precyzji ułożenia pocisku w cewce; nawet niewielkie przesunięcie może istotnie zmienić prędkość wylotową. W warunkach laboratoryjnych, przy starannym pozycjonowaniu pocisku, możliwe jest uzyskanie rozrzutu wyników poniżej 3%, co potwierdzają wyniki niniejszych badań.

7. Analiza energetyczna

W kolejnym etapie obliczono energię kinetyczną pocisku. Na jej podstawie wyznaczono również sprawność energetyczną zestawu HU-064.

Energia kinetyczna pocisku, obliczona dla średniej prędkości $\bar{v} = 5,60 \text{ m/s}$, wynosi:

$$E_K = \frac{1}{2} \cdot m \cdot \bar{v}^2 = 0,0185 \text{ J}$$

Sprawność energetyczną układu zdefiniowano jako stosunek energii kinetycznej pocisku do energii zgromadzonej w kondensatorze, otrzymano wartość:

$$\eta = (E_K / E_C) \cdot 100\% = (0,0185 / 4,14) \cdot 100\% \approx 0,45\%$$

Uzyskana sprawność na poziomie 0,45% jest typowa dla prostych, jednostopniowych konstrukcji coilgunów pozbawionych precyzyjnego układu sterowania czasem rozłączenia prądu. W literaturze opisano bardziej zaawansowane konstrukcje osiągające większe sprawności [Camp, 2023; Chen i in., 2024]. Wymaga to optymalizacji geometrii cewki,

precyzyjnego pozycjonowania pocisku, odpowiedniej konfiguracji magazynowania energii oraz przede wszystkim układu sterowania impulsami prądowymi. Różnica między sprawnością badanego zestawu a wynikami literaturowymi ilustruje skalę potencjalnej optymalizacji prostych układów DIY.

Dodatkowo, w ramach serii weryfikacyjnej przeprowadzonej przy obniżonym napięciu 50 V, średnia prędkość pocisku wyniosła wówczas 3,1 m/s. Stosunek prędkości uzyskanych dla obu napięć ($5,60 / 3,1 \approx 1,81$) jest zbliżony do stosunku napięć zasilania ($91 / 50 = 1,82$). Wynik ten jest zgodny z uproszczonym modelem, w którym prędkość pocisku w jednostopniowym coilgunie jest w przybliżeniu proporcjonalna do napięcia zasilania, przy założeniu stałej masy pocisku i podobnych warunków sprzężenia magnetycznego. Potwierdza to spójność wyników pomiarowych. Różnica rzędu 1% między stosunkiem prędkości a stosunkiem napięć może wynikać z nieliniowości charakterystyk magnetycznych oraz wpływu sił tarcia w cewce.

Warto również odnieść uzyskane wyniki do danych literaturowych dotyczących prostych, jednostopniowych coilgunów. W publikacji [Świąćicka i in., 2024] zostało opisane stanowisko z magnesem trwałym jako pociskiem, w którym uzyskiwano prędkości wylotowe rzędu kilku m/s przy zasilaniu bezpiecznym napięciem 24 V DC. Są to wartości tego samego rzędu wielkości co wyniki uzyskane w niniejszej pracy. Porównanie to potwierdza, że zestaw HU-064, mimo istotnych ograniczeń konstrukcyjnych, może generować impulsy energetyczne o parametrach użytecznych w badaniach wstępnych.

8. Ograniczenia i potencjał zastosowań

Główne ograniczenia badanego rozwiązania obejmują niską sprawność energetyczną (0,45%), silną zależność wyników od dokładnego pozycjonowania pocisku w cewce, brak układu synchronizacji impulsu oraz stosunkowo małą energię kinetyczną (0,018 J), która zawęża zakres zastosowań do bardzo lekkich i cienkich materiałów. Ponadto prosty układ nie umożliwia precyzyjnej regulacji energii uderzenia w szerokim zakresie, ponieważ jedynym parametrem regulacyjnym jest napięcie ładowania kondensatora. Ograniczenie to wynika bezpośrednio z konstrukcji zestawu oraz braku możliwości łatwej wymiany kondensatora lub cewki napędowej.

Do zalet urządzenia należą natomiast bardzo niski koszt zakupu (około 100 zł), prosta konstrukcja, łatwość wykonywania powtarzalnych pomiarów prędkości, możliwość pracy bezpiecznym napięciem zasilania 3 V oraz łatwa dostępność zestawu. Energia kinetyczna rzędu 0,018 J mieści się w dolnym zakresie energii stosowanych w badaniach typu low-velocity impact oraz we wstępnych testach igłoodporności. Analiza mechanizmu głębokiej penetracji ciał miękkich, takich jak skóra i gumy silikonowe, przedstawiona przez [Shergolda i Flecka, 2004], wskazuje na znaczenie kontroli geometrii penetratora, którą można uzyskać poprzez zmianę kształtu pocisku, oraz energii uderzenia. Autorzy wykazali, że mechanizm penetracji zależy od kształtu końcówki penetratora: ostra końcówka sprzyja powstawaniu pęknięcia w trybie I, natomiast końcówka płaska prowadzi do pęknięcia pierścieniowego w trybie II. Podobnie badania [Chen i in., 2020] nad perforacją cienkich folii polimerowych z wykorzystaniem mikroprojektyli wskazują, że dynamiczne przebicie materiału zależy zarówno od prędkości pocisku, jak i od grubości oraz właściwości mechanicznych próbek. Z kolei [Tatarek i in., 2021] badali wpływ kąta uderzenia na charakter uszkodzeń paneli

kompozytowych, co podkreśla potrzebę stosowania powtarzalnych i kontrolowanych źródeł impulsu energetycznego w badaniach materiałowych. Wyniki niniejszej pracy wskazują, że nawet bardzo proste i tanie urządzenie może generować impulsy energetyczne mieszczące się w zakresie zainteresowania tych dziedzin.

W kontekście badań igłoodporności i testów typu low-velocity impact przedstawione urządzenie może pełnić funkcję narzędzia przeznaczonego do szybkiej, wstępnej oceny odporności cienkich folii, membran, tkanin technicznych lub opakowań medycznych. Takie zastosowanie jest spójne z podejściem [Evansa i in. 2023], którzy wskazali potrzebę łączenia wyników badań przebicia cienkich folii z zachowaniem materiałów w większej skali oraz podkreślili znaczenie testów wykorzystujących małe, kontrolowane pociski. Nie zastępuje ono znormalizowanych metod badawczych, takich jak ASTM F1342 i ISO 13996, lecz może stanowić ich uzupełnienie na etapie wstępnej selekcji materiałów lub w zastosowaniach edukacyjnych. Dodatkową zaletą jest możliwość wykorzystania urządzenia w dydaktyce jako demonstratora zasad elektromagnetyzmu, balistyki oraz rachunku niepewności pomiarowej.

Potencjalne kierunki rozwoju obejmują wprowadzenie układu sterowania czasem impulsu opartego na mikrokontrolerze, na przykład Arduino lub STM32, wraz z czujnikiem położenia pocisku, zastosowanie cewki o zoptymalizowanej geometrii, wykorzystanie pocisków z magnesów trwałych oraz rozbudowę układu o regulację energii w szerszym zakresie. Kierunek ten znajduje uzasadnienie w pracy [Chen i in., 2024], w której poprawę sprawności jednostopniowego coilguna wiązano m.in. z bipolarnym sterowaniem impulsu, niejednorodnym uzwojeniem oraz zastosowaniem pocisku z magnesu trwałego. Działania te, przy zachowaniu niskiego kosztu rozwiązania, mogłyby istotnie zwiększyć sprawność i użyteczność urządzenia w badaniach materiałowych. Szczególnie obiecujące wydaje się połączenie taniej platformy mikrokontrolerowej z istniejącym zestawem, co pozwoliłoby utrzymać niski próg wejścia, a jednocześnie poprawić parametry energetyczne układu.

9. Wnioski

Na podstawie przeprowadzonych badań sformułowano następujące wnioski:

1. Przy maksymalnym napięciu 91 V zestaw HU-064 generował uderzenia o energii kinetycznej $E_K \approx 0,018$ J oraz prędkości pocisku $v = (5,60 \pm 0,06)$ m/s.
2. Sprawność energetyczna układu wyniosła $\eta \approx 0,45\%$, co jest wartością charakterystyczną dla prostych, jednostopniowych konstrukcji coilgunów pozbawionych sterowania czasem impulsu prądowego.
3. Uzyskane wartości energii kinetycznej mieszczą się w dolnym zakresie energii stosowanych w badaniach typu low-velocity impact oraz we wstępnych testach igłoodporności.
4. Ze względu na bardzo niski koszt, prostą konstrukcję oraz możliwość generowania powtarzalnych uderzeń o kontrolowanej, choć niewielkiej energii, przedstawione rozwiązanie może stanowić praktyczne narzędzie do wstępnych testów cienkich materiałów ochronnych, opakowań medycznych oraz wybranych biomateriałów.
5. Dalszy rozwój układu powinien obejmować przede wszystkim wprowadzenie precyzyjnego sterowania czasem impulsu prądowego, na przykład z wykorzystaniem mikrokontrolera, oraz poprawę sprzężenia magnetycznego między cewką a pociskiem. Zmiany te mogłyby istotnie zwiększyć sprawność energetyczną układu i powtarzalność uzyskiwanych wyników.

Bibliografia:

- 1 ASTM F1342 / F1342M-05 (2013). Standard Test Method for Protective Clothing Material Resistance to Puncture.
- 2 Camp J.T. (2023). Optimizing the Energy Storage Configuration of a Single Stage Coilgun to Maximize Efficiency. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 51(5), s. 1377–1383. DOI: 10.1109/TPS.2023.3266107.
- 3 Centexbel (2025). ISO 13996 resistance to puncture [film]. YouTube. <https://www.youtube.com/watch?v=Vg5krMlggEs> (dostęp: 11.08.2026).
- 4 Chen S., Peng A., Chen A., Liu T. (2024). Design and Characterization of High Efficiency Single-stage Electromagnetic Coil Guns. arXiv:2410.07594. DOI: 10.48550/arXiv.2410.07594.
- 5 Chen S.H., Souna A.J., Soles C.L., Stranick S.J., Chan E.P. (2020). Using microprojectiles to study the ballistic limit of polymer thin films. *Soft Matter*, 16(16), s. 3886–3890. DOI: 10.1039/D0SM00295J.
- 6 Einat M., Orbach Y. (2023). A multi-stage 130 m/s reluctance linear electromagnetic launcher. *Scientific Reports*, 13, 218. DOI: 10.1038/s41598-022-27022-z.
- 7 Evans K.M., Chen S.H., Souna A.J., Stranick S.J., Soles C.L., Chan E.P. (2023). The projectile perforation resistance of materials: scaling the impact resistance of thin films to macroscale materials. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 15(27), s. 32916–32925. DOI: 10.1021/acsami.3c05130.
- 8 ISO 13996:1999. Protective clothing – Mechanical properties – Determination of resistance to puncture.
- 9 HU-064 High Voltage Electromagnetic Transmitter DIY Kit. Dokumentacja producenta / instrukcja użytkownika.
- 10 Clamp-style Tachymeter – chronograf optyczny. Dokumentacja producenta.
- 11 Shergold O.A., Fleck N.A. (2004). Mechanisms of deep penetration of soft solids, with application to the injection and wounding of skin. *Proceedings of the Royal Society A*, 460(2050), s. 3037–3058. DOI: 10.1098/rspa.2004.1315.
- 12 Święcicka A., Makowski T., Worwa M. (2024). Stanowisko laboratoryjne ze sterownikiem PLC do badania elektromagnetycznej wyrzutni typu coilgun z magnesem trwałym jako pociskiem. *Elektronika*, 65(9), s. 30–33. DOI: 10.15199/13.2024.9.6.
- 13 Tatarek M., Gradowski W., Sławski S., Szymiczek M., Domin J. (2021). Projekt stanowiska do weryfikacji wpływu kąta uderzenia na uszkodzenia powstałe w panelach kompozytowych. W: S. Duda, P. Jureczko, T. Machoczek (red.), *XII Warsztaty Naukowe Studenckiego Koła Mechatroniki* (s. 133–140). Gliwice: Politechnika Śląska.

7. ZINTEGROWANA OCENA RYZYKA TECHNICZNEGO I ZAWODOWEGO W ENERGETYCE WIATROWEJ – KONTEKST INŻYNIERII BEZPIECZEŃSTWA

Michał Przygoda

Instytut Nauk Technicznych i Zarządzania

Polski Uniwersytet na Obczyźnie w Londynie

POSK, 3rd Floor

238-246 King Streetm London W6 0RF

Wielka Brytania

E-mail: michal.przygoda@puno.ac.uk

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-2627-2886>

1. Uwagi wprowadzające

Transformacja energetyczna, ukierunkowana na ograniczenie emisji gazów cieplarnianych oraz zwiększenie udziału odnawialnych źródeł energii, przyczynia się do dynamicznego rozwoju sektora energetyki wiatrowej. Zarówno lądowe, jak i morskie farmy wiatrowe odgrywają coraz większą rolę w krajowych i europejskich systemach elektroenergetycznych, stając się jednym z podstawowych filarów realizacji polityki klimatycznej oraz bezpieczeństwa energetycznego. Rozwój ten wiąże się jednak ze wzrostem stopnia zaawansowania technologicznego turbin wiatrowych, rozbudową infrastruktury technicznej oraz zwiększeniem liczby procesów związanych z ich montażem, eksploatacją i serwisowaniem [Klimaszewska, 2024].

Środowisko pracy w energetyce wiatrowej należy do najbardziej wymagających pod względem bezpieczeństwa. Pracownicy wykonują obowiązki na znacznych wysokościach, często w trudnych warunkach atmosferycznych, przy wykorzystaniu urządzeń o wysokim stopniu złożoności technicznej. Dodatkowo realizacja prac serwisowych wymaga jednoczesnego prowadzenia działań mechanicznych, elektrycznych oraz informatycznych, co powoduje nakładanie się zagrożeń o różnym charakterze i źródle. W konsekwencji bezpieczeństwo pracy zależy nie tylko od zachowania pracownika i organizacji procesu pracy, lecz również od niezawodności systemów technicznych, jakości zastosowanych rozwiązań konstrukcyjnych oraz skuteczności funkcjonujących zabezpieczeń [Kacprzak, 2022].

W praktyce zarządzania bezpieczeństwem dominującym narzędziem pozostaje ocena ryzyka zawodowego, której celem jest identyfikacja zagrożeń występujących na stanowisku pracy oraz określenie środków ograniczających prawdopodobieństwo wystąpienia wypadków. Podejście to koncentruje się przede wszystkim na relacji między pracownikiem a środowiskiem pracy. Znacznie rzadziej uwzględnia ono ryzyko techniczne wynikające z możliwych awarii urządzeń, błędów projektowych, niewłaściwej eksploatacji infrastruktury lub uszkodzeń elementów systemu technicznego. Tymczasem właśnie tego rodzaju zdarzenia mogą inicjować sytuacje niebezpieczne prowadzące do poważnych konsekwencji zarówno dla ludzi, jak i dla samej infrastruktury energetycznej [Łunarski, 2002].

W literaturze przedmiotu zagadnienia oceny ryzyka zawodowego oraz analizy bezpieczeństwa systemów technicznych są najczęściej rozwijane jako odrębne obszary badawcze [Krause, 2026; Karczewski, 2000; Koradecka, 2008; Krause, 2011, s. 59; Zawieska, 2009]. Inżynieria bezpieczeństwa wykorzystuje metody umożliwiające identyfikację mechanizmów awarii, analizę scenariuszy rozwoju zdarzeń niebezpiecznych oraz ocenę skuteczności stosowanych barier ochronnych, natomiast systemy bezpieczeństwa i higieny pracy koncentrują się przede wszystkim na ochronie pracownika przed skutkami zidentyfikowanych zagrożeń. W sektorze energetyki wiatrowej oba te obszary pozostają jednak ze sobą ściśle powiązane, ponieważ większość zagrożeń zawodowych ma swoje źródło w funkcjonowaniu systemów technicznych [Węgrzyn, 2013].

Powstaje zatem problem badawczy sprowadzający się do pytania, czy możliwe jest opracowanie zintegrowanego modelu oceny ryzyka, który jednocześnie uwzględniałby ryzyko techniczne związane z funkcjonowaniem infrastruktury energetyki wiatrowej oraz ryzyko zawodowe dotyczące bezpieczeństwa pracowników. Rozwiązanie tego problemu może przyczynić się do zwiększenia skuteczności działań prewencyjnych oraz poprawy efektywności systemów zarządzania bezpieczeństwem.

Celem niniejszego artykułu jest przedstawienie koncepcji zintegrowanej oceny ryzyka technicznego i zawodowego w energetyce wiatrowej, wykorzystującej rozwiązania wypracowane w ramach inżynierii bezpieczeństwa oraz klasycznych systemów zarządzania bezpieczeństwem i higieną pracy. W opracowaniu zaprezentowano model łączący analizę przyczyn awarii, ocenę scenariuszy rozwoju zdarzeń niebezpiecznych oraz określenie akceptowalnego poziomu ryzyka. Przyjęto, że integracja tych elementów umożliwia pełniejszą identyfikację zagrożeń oraz bardziej kompleksową ocenę bezpieczeństwa procesów realizowanych w sektorze energetyki wiatrowej.

Artykuł ma charakter koncepcyjno-przeglądowy. Podstawę opracowania stanowi krytyczna analiza literatury krajowej i zagranicznej z zakresu inżynierii bezpieczeństwa, zarządzania ryzykiem oraz bezpieczeństwa i higieny pracy w energetyce wiatrowej. Uzupełniając przeprowadzono analizę obowiązujących norm i wytycznych dotyczących zarządzania ryzykiem, w szczególności norm ISO 31000, ISO/IEC 31010 oraz IEC 60812, a także analizę porównawczą wybranych metod oceny ryzyka stosowanych w systemach bezpieczeństwa technicznego. Na podstawie wyników przeprowadzonych analiz opracowano autorską koncepcję zintegrowanego modelu oceny ryzyka, wykorzystującego komplementarne zastosowanie metod FMEA, Bow-Tie oraz zasady ALARP. Przedstawiony w dalszej części artykułu przykład zastosowania modelu ma charakter ilustracyjny i służy zobrazowaniu proponowanego podejścia. Zaproponowany model wymaga jednak dalszej weryfikacji empirycznej w warunkach rzeczywistej eksploatacji farm wiatrowych.

2. Ryzyko techniczne i ryzyko zawodowe w energetyce wiatrowej

2.1. Charakterystyka zagrożeń technicznych w energetyce wiatrowej

Energetyka wiatrowa należy do gałęzi przemysłu wykorzystujących wysoko zaawansowane systemy techniczne, których niezawodność warunkuje zarówno ciągłość produkcji energii, jak i bezpieczeństwo osób uczestniczących w procesach montażu, eksploatacji oraz serwisowania urządzeń. Współczesne turbiny wiatrowe stanowią złożone układy mechatroniczne integrujące elementy konstrukcyjne, mechaniczne, hydrauliczne, elektryczne oraz informatyczne.

W odróżnieniu od wielu innych instalacji przemysłowych pracują one w sposób ciągły pod wpływem zmiennych oddziaływań środowiskowych, takich jak turbulencje przepływu powietrza, zmienne obciążenia dynamiczne, opady atmosferyczne, promieniowanie UV, wyładowania atmosferyczne czy w przypadku farm morskich również środowisko silnie korozyjne. Powoduje to, że proces degradacji poszczególnych elementów konstrukcyjnych ma charakter wieloczynnikowy i często prowadzi do kumulacji uszkodzeń zmęczeniowych w całym okresie eksploatacji turbiny [Feng, Li, Shangguan, Fan, Zhang, 2023].

Typowa turbina wiatrowa składa się z fundamentu, wieży, gondoli, wirnika z łopatom, układu przeniesienia napędu, generatora, systemów hamulcowych, układu nastawiania łopat, układu ustawiania gondoli względem kierunku wiatru, układów elektrycznych, systemów sterowania oraz rozbudowanych systemów monitorowania stanu technicznego. Prawidłowe funkcjonowanie każdego z wymienionych podzespołów warunkuje bezpieczną pracę całego obiektu. Charakterystyczną cechą turbin wiatrowych jest wzajemna zależność poszczególnych układów – awaria jednego komponentu może prowadzić do przeciążenia kolejnych elementów, inicjując rozwój złożonych scenariuszy awaryjnych [Burton, Sharped, Jenkins, Bossanyi, 2001].

Jednym z najbardziej obciążonych elementów konstrukcyjnych są łopaty wirnika. Pracują one pod wpływem cyklicznych obciążeń aerodynamicznych oraz zmiennych warunków środowiskowych, co sprzyja powstawaniu uszkodzeń zmęczeniowych materiału kompozytowego. Do najczęściej obserwowanych uszkodzeń należą pęknięcia laminatu, rozwarstwienia, erozja powierzchni natarcia, uszkodzenia spowodowane wyładowaniami atmosferycznymi oraz lokalne deformacje wynikające z wad produkcyjnych lub przeciążenia eksploatacyjnego. Uszkodzenia łopat mogą prowadzić do pogorszenia właściwości aerodynamicznych, zwiększenia drgań całego układu, a w skrajnych przypadkach do oderwania fragmentów konstrukcji lub całkowitego zniszczenia wirnika [Uracz i Karolewski, 2006].

Istotnym źródłem awarii pozostaje również przekładnia mechaniczna, która w większości turbin odpowiada za przeniesienie momentu obrotowego z wolnoobrotowego wału wirnika na szybkoobrotowy wał generatora. Ze względu na bardzo duże obciążenia zmienne przekładnia należy do elementów o najwyższych kosztach utrzymania i napraw. Najczęściej identyfikowane uszkodzenia obejmują zużycie kół zębatach, uszkodzenia łożysk, degradację środków smarnych oraz uszkodzenia wałów i sprzęgieł. Awarie przekładni skutkują nie tylko znacznymi stratami ekonomicznymi wynikającymi z przestojów, lecz również zwiększają ryzyko wtórnych uszkodzeń generatora oraz układu napędowego [Głogowski, Orymowska, Pilip, 2017].

Generator stanowi kolejny element krytyczny z punktu widzenia niezawodności całego systemu. Do typowych mechanizmów uszkodzeń zalicza się przegrzewanie uzwojeń, degradację izolacji elektrycznej, uszkodzenia łożysk oraz zakłócenia pracy układów chłodzenia. Współczesne rozwiązania konstrukcyjne coraz częściej wykorzystują generatory bezprzekładniowe, eliminujące jeden z najbardziej awaryjnych elementów układu napędowego. Nie oznacza to jednak całkowitego wyeliminowania ryzyka technicznego, gdyż wzrasta znaczenie niezawodności układów energoelektronicznych oraz systemów sterowania odpowiedzialnych za współpracę generatora z siecią elektroenergetyczną [Burton i in., 2001].

Szczególne znaczenie dla bezpieczeństwa eksploatacji mają również układy hamulcowe, których zadaniem jest zatrzymanie wirnika podczas sytuacji awaryjnych lub prac serwisowych. Niewłaściwe działanie hamulców może prowadzić do niekontrolowanego wzrostu prędkości obrotowej wirnika, przeciążenia elementów konstrukcyjnych oraz uszkodzeń całego układu

napędowego. Z perspektywy bezpieczeństwa pracy awaria układu hamulcowego stanowi jedno z najpoważniejszych zagrożeń dla personelu wykonującego czynności konserwacyjne wewnątrz gondoli [Garbala, Tokajuk, Kałaur, Cybulko, 2020].

Rosnący stopień automatyzacji powoduje, że coraz większego znaczenia nabierają układy elektryczne oraz systemy sterowania. Funkcjonowanie nowoczesnych turbin opiera się na ciągłej wymianie informacji pomiędzy czujnikami, sterownikami PLC, układami regulacji kąta nastawienia łopat, systemami orientacji gondoli oraz nadrzędnymi systemami SCADA. Błędy oprogramowania, awarie czujników, zakłócenia transmisji danych lub nieprawidłowe algorytmy sterowania mogą prowadzić do niewłaściwej reakcji turbiny na zmieniające się warunki pracy, zwiększając prawdopodobieństwo wystąpienia uszkodzeń mechanicznych lub niebezpiecznych zdarzeń eksploatacyjnych [Peng i in., 2023; Burton i in., 2001].

Z punktu widzenia inżynierii bezpieczeństwa awarie techniczne nie ograniczają się do skutków ekonomicznych ani przerw w produkcji energii, lecz mogą inicjować zagrożenia bezpośrednio oddziałujące na ludzi. Uszkodzenie łopaty może prowadzić do odrywania elementów konstrukcyjnych, awaria instalacji elektrycznej do porażenia prądem lub pożaru gondoli, natomiast niekontrolowany obrót wirnika podczas prac serwisowych do ciężkich wypadków. Wskazuje to na systemowy charakter zagrożeń technicznych oraz konieczność uwzględniania ich wpływu na bezpieczeństwo personelu [Peng i in., 2023; Burton i in., 2001; Martinez Luengo, Kolios, 2015].

2.2. Charakterystyka zagrożeń zawodowych podczas eksploatacji i serwisowania turbin wiatrowych

Rozwój sektora energetyki wiatrowej spowodował powstanie nowej grupy zawodowej obejmującej monterów, serwisantów oraz specjalistów odpowiedzialnych za diagnostykę i utrzymanie ruchu turbin wiatrowych. Charakter wykonywanych przez nich czynności znacząco odbiega od typowych prac przemysłowych, ponieważ realizowane są one w środowisku łączącym zagrożenia charakterystyczne dla budownictwa wysokościowego, elektroenergetyki, przemysłu maszynowego oraz prac prowadzonych w przestrzeniach zamkniętych. W konsekwencji bezpieczeństwo pracy w energetyce wiatrowej wymaga jednoczesnego uwzględnienia wielu współwystępujących czynników ryzyka, które wzajemnie się potęgują i mogą prowadzić do wystąpienia zdarzeń o bardzo poważnych skutkach dla zdrowia lub życia pracowników [CIOP-PIB].

Najbardziej charakterystycznym zagrożeniem zawodowym pozostają prace wykonywane na wysokości. Współczesne turbiny wiatrowe osiągają wysokość przekraczającą 150 m, natomiast sama gondola robocza jest najczęściej usytuowana na poziomie od 80 do ponad 120 m nad powierzchnią terenu. Dostęp do niej odbywa się z wykorzystaniem pionowych drabin wyposażonych w systemy asekuracyjne lub wind serwisowych, przy czym nawet w przypadku zastosowania urządzeń transportowych pracownik wielokrotnie przemieszcza się po konstrukcji z wykorzystaniem środków ochrony indywidualnej zabezpieczających przed upadkiem z wysokości. Do podstawowych zagrożeń należą upadek podczas wspinaczki, utrata równowagi w trakcie wykonywania czynności serwisowych, spadanie narzędzi i materiałów oraz ograniczona możliwość natychmiastowego udzielenia pomocy poszkodowanemu. Z tego względu prace na wysokości uznawane są za czynności o najwyższym poziomie ryzyka w całym cyklu eksploatacji turbin wiatrowych [CIOP-PIB; Sowa i Wincencik, 2008].

Istotnym źródłem zagrożeń są również prace wykonywane przy urządzeniach elektroenergetycznych. Turbiny wiatrowe stanowią źródło energii elektrycznej wysokiego napięcia, a czynności konserwacyjne obejmują obsługę generatorów, transformatorów, rozdzielni, przekształtników energoelektronicznych oraz układów sterowania. Personel techniczny narażony jest na porażenie prądem elektrycznym, powstanie łuku elektrycznego, oparzenia oraz skutki pożaru instalacji elektrycznej. Ryzyko to wzrasta szczególnie podczas wykonywania prac diagnostycznych, usuwania awarii oraz czynności prowadzonych w warunkach podwyższonej wilgotności. W praktyce przemysłowej podstawowym środkiem ograniczającym to zagrożenie pozostaje stosowanie procedur izolowania źródeł energii, odpowiednie kwalifikacje personelu oraz rygorystyczne przestrzeganie procedur eksploatacyjnych [CIOP-PIB].

Charakterystyczną cechą turbin wiatrowych jest również wykonywanie wielu prac w przestrzeniach spełniających kryteria przestrzeni zamkniętych. Dotyczy to przede wszystkim wnętrza wieży, gondoli, piasty wirnika oraz niektórych przestrzeni technicznych znajdujących się wewnątrz łopat wirnika. Miejsca te charakteryzują się ograniczoną możliwością przemieszczania się, utrudnioną ewakuacją oraz możliwością występowania atmosfer niebezpiecznych powstających wskutek pożaru, wycieku substancji eksploatacyjnych lub prowadzonych prac technologicznych. Dodatkowym zagrożeniem pozostaje możliwość jednoczesnego oddziaływania czynników mechanicznych i elektrycznych w warunkach znacznie utrudnionej komunikacji z zespołem znajdującym się poza turbiną. W literaturze podkreśla się, że każda praca wykonywana w tego rodzaju przestrzeniach powinna być poprzedzona odrębną oceną ryzyka oraz przygotowaniem procedur ratowniczych dostosowanych do konkretnego typu turbiny [Wieteska, 2017].

Do grupy zagrożeń o charakterze mechanicznym zalicza się przede wszystkim możliwość kontaktu z elementami wirującymi, przemieszczającymi się lub magazynującymi energię mechaniczną. Podczas prowadzenia prac serwisowych pracownicy mają styczność z przekładniami, wałami napędowymi, układami hamulcowymi, siłownikami hydraulicznymi oraz mechanizmami nastawiania łopat i orientacji gondoli. Nieprawidłowe zabezpieczenie urządzeń przed niezamierzonym uruchomieniem może prowadzić do zmiężdżeń, pochwycenia części ciała przez elementy ruchome lub uderzenia przemieszczającymi się komponentami. Z punktu widzenia bezpieczeństwa pracy szczególnie niebezpieczne są sytuacje, w których dochodzi do jednoczesnego wystąpienia energii mechanicznej, elektrycznej oraz hydraulicznej, wymagające kompleksowego odizolowania wszystkich źródeł energii przed rozpoczęciem prac konserwacyjnych [CIOP-PIB].

Zagrożenia zawodowe występujące podczas eksploatacji turbin wiatrowych mają zatem charakter wieloczynnikowy i nie ograniczają się do pojedynczego rodzaju niebezpieczeństwa. Przeciwnie, specyfika środowiska pracy powoduje, że pracownik jednocześnie narażony jest na oddziaływanie zagrożeń wysokościowych, elektrycznych, mechanicznych oraz organizacyjnych. Taka kumulacja czynników ryzyka sprawia, że klasyczna ocena ryzyka zawodowego wymaga uwzględnienia nie tylko prawdopodobieństwa wystąpienia poszczególnych zagrożeń, lecz również ich wzajemnych zależności oraz możliwości eskalacji skutków w przypadku wystąpienia zdarzenia inicjującego. Stanowi to jeden z podstawowych argumentów przemawiających za stosowaniem bardziej kompleksowych metod analizy bezpieczeństwa, wykraczających poza tradycyjne podejście stanowiskowe.

Szczególną kategorię zagrożeń charakterystycznych dla energetyki wiatrowej stanowią sytuacje wymagające ewakuacji pracowników z gondoli turbiny. Konieczność przeprowadzenia ewakuacji może wynikać zarówno z awarii technicznej urządzenia, jak i z nagłego pogorszenia stanu zdrowia pracownika, pożaru, zadymienia wnętrza gondoli lub utraty możliwości bezpiecznego opuszczenia wieży z wykorzystaniem standardowej drogi komunikacyjnej. Ze względu na wysokość położenia stanowiska pracy oraz ograniczoną przestrzeń manewrową prowadzenie działań ratowniczych jest znacznie bardziej skomplikowane niż w typowych zakładach przemysłowych. W praktyce stosuje się specjalistyczne systemy ewakuacyjne umożliwiające kontrolowane opuszczenie pracownika po zewnętrznej stronie wieży lub wykorzystanie technik linowych przez odpowiednio przeszkolone zespoły ratownicze. Skuteczność działań ratowniczych zależy jednak nie tylko od dostępności odpowiedniego sprzętu, lecz przede wszystkim od właściwego przygotowania personelu oraz regularnego prowadzenia ćwiczeń praktycznych [Sowa i in., 2008; Szczerba 2013].

Na poziom bezpieczeństwa pracy istotny wpływ wywierają również warunki atmosferyczne. Turbiny wiatrowe eksploatowane są w środowisku otwartym, w którym pracownicy narażeni są na oddziaływanie silnego wiatru, opadów atmosferycznych, niskiej i wysokiej temperatury, oblodzenia konstrukcji oraz wyładowań atmosferycznych. Czynniki te wpływają zarówno na możliwość bezpiecznego wykonywania czynności serwisowych, jak i na sprawność psychofizyczną pracowników. Silny wiatr może utrudniać poruszanie się po konstrukcji i pogarszać skuteczność środków ochrony indywidualnej, natomiast oblodzenie zwiększa ryzyko poślizgnięcia się oraz upadku z wysokości. Z kolei wyładowania atmosferyczne stanowią zagrożenie zarówno dla integralności technicznej turbiny, jak i dla osób przebywających wewnątrz obiektu. W konsekwencji planowanie prac eksploatacyjnych powinno uwzględniać bieżące monitorowanie warunków meteorologicznych oraz możliwość czasowego wstrzymania robót w przypadku przekroczenia dopuszczalnych parametrów środowiskowych [Sowa i in., 2008].

W ostatnich latach coraz większą uwagę poświęca się również zagrożeniom ergonomicznym i psychospołecznym występującym podczas eksploatacji farm wiatrowych. Prace serwisowe często wykonywane są w wymuszonej pozycji ciała, w ograniczonej przestrzeni roboczej oraz z wykorzystaniem ciężkich narzędzi i elementów konstrukcyjnych. Wielokrotne pokonywanie pionowych drabin, transport wyposażenia oraz wykonywanie precyzyjnych czynności technicznych prowadzą do znacznego obciążenia układu mięśniowo-szkieletowego. W literaturze wskazuje się, że przewlekłe przeciążenia mogą zwiększać częstość występowania schorzeń układu ruchu, zwłaszcza w obrębie kręgosłupa, barków i kończyn górnych [CIOP-PIB; Cuhna, Silva, Macedo, 2024].

Nie mniej istotne pozostają czynniki psychospołeczne. Praca w niewielkich zespołach, znaczne oddalenie od zaplecza technicznego, odpowiedzialność za utrzymanie ciągłości pracy instalacji, presja czasu związana z ograniczonym „oknem pogodowym” oraz konieczność podejmowania decyzji w warunkach podwyższonego ryzyka powodują zwiększone obciążenie psychiczne pracowników. Długotrwała ekspozycja na stres może prowadzić do obniżenia koncentracji, pogorszenia procesu podejmowania decyzji oraz zwiększenia prawdopodobieństwa popełnienia błędu ludzkiego. Z punktu widzenia współczesnych systemów zarządzania bezpieczeństwem czynniki psychospołeczne uznawane są obecnie za jeden z elementów

wpływających na poziom ryzyka zawodowego, wymagający uwzględnienia na równi z zagrożeniami fizycznymi i technicznymi [Wyrębek 2012; Knopper, Ollson, 2011].

Analiza zagrożeń zawodowych występujących podczas eksploatacji i serwisowania turbin wiatrowych wskazuje, że środowisko pracy charakteryzuje się jednoczesnym oddziaływaniem licznych czynników niebezpiecznych, szkodliwych i uciążliwych. Co istotne, zagrożenia te rzadko występują w izolacji. Przeciwnie, najczęściej tworzą wzajemnie powiązany układ, w którym wystąpienie jednego zdarzenia może prowadzić do eskalacji kolejnych niebezpiecznych sytuacji. Przykładowo awaria układu elektrycznego może doprowadzić do pożaru gondoli, którego konsekwencją będzie konieczność przeprowadzenia ewakuacji pracowników z wysokości w niekorzystnych warunkach atmosferycznych. Analogicznie uszkodzenie mechaniczne elementów wirnika może wymusić wykonywanie awaryjnych prac serwisowych przy ograniczonej dostępności infrastruktury ratowniczej. Przedstawione przykłady wskazują, że zagrożenia zawodowe w energetyce wiatrowej mają charakter złożony i wieloczynnikowy, a ich właściwa identyfikacja wymaga uwzględnienia zarówno warunków wykonywania pracy, jak i specyfiki eksploatowanej infrastruktury technicznej.

2.3. Współzależność ryzyka technicznego i ryzyka zawodowego

Analiza zagrożeń występujących podczas eksploatacji turbin wiatrowych wskazuje, że podział na ryzyko techniczne oraz ryzyko zawodowe ma przede wszystkim charakter metodologiczny. W praktyce eksploatacyjnej oba rodzaje ryzyka tworzą wzajemnie powiązany system zależności, w którym uszkodzenia elementów technicznych determinują poziom bezpieczeństwa pracowników, natomiast sposób wykonywania czynności eksploatacyjnych wpływa na niezawodność infrastruktury technicznej. Oznacza to, że ocena bezpieczeństwa nie powinna ograniczać się wyłącznie do analizy jednego z tych obszarów, lecz wymaga uwzględnienia ich wzajemnych relacji oraz mechanizmów oddziaływania [Peng i in., 2023; CIOP-PIB; Kim, Nam, Lee, Kang, Kim, 2024].

Z perspektywy inżynierii bezpieczeństwa każde uszkodzenie elementu technicznego należy traktować jako zdarzenie inicjujące rozwój określonego scenariusza awaryjnego. Uszkodzenie łopaty wirnika może prowadzić do utraty równowagi dynamicznej całego układu, awaria układu hamulcowego do niekontrolowanego wzrostu prędkości obrotowej wirnika, natomiast uszkodzenie układów sterowania do niezamierzonego uruchomienia urządzeń podczas prowadzenia prac konserwacyjnych. Każde z tych zdarzeń powoduje zmianę warunków pracy człowieka i generuje nowe zagrożenia zawodowe, których nie można zidentyfikować wyłącznie na podstawie klasycznej analizy stanowiska pracy [Peng i in., 2023; Garbala i in., 2020].

Jednocześnie należy zauważyć, że zależność pomiędzy ryzykiem technicznym a ryzykiem zawodowym ma charakter dwukierunkowy. O ile awarie urządzeń wpływają na bezpieczeństwo pracowników, o tyle błędy popełniane podczas wykonywania czynności eksploatacyjnych mogą prowadzić do uszkodzeń infrastruktury technicznej. Nieprawidłowo przeprowadzona konserwacja, niewłaściwy montaż elementów konstrukcyjnych, pominięcie procedur kontrolnych lub nieprzestrzeganie zasad izolowania źródeł energii zwiększają prawdopodobieństwo wystąpienia awarii w późniejszym okresie eksploatacji. Potwierdza to, że czynnik ludzki stanowi integralny element funkcjonowania systemu technicznego, a nie wyłącznie odbiorcę jego oddziaływania [Sowa i in., 2008].

W literaturze z zakresu bezpieczeństwa procesowego podkreśla się, że rozwój poważnych zdarzeń awaryjnych najczęściej ma charakter sekwencyjny. Wypadek nie jest skutkiem pojedynczego błędu lub pojedynczej awarii, lecz rezultatem stopniowej utraty skuteczności kolejnych barier bezpieczeństwa. Dotyczy to zarówno barier technicznych, takich jak systemy zabezpieczeń, układy hamulcowe czy systemy sterowania, jak również barier organizacyjnych obejmujących procedury eksploatacyjne, kompetencje personelu, nadzór oraz kulturę bezpieczeństwa organizacji. Współczesne koncepcje zarządzania ryzykiem wskazują, że skuteczność systemu bezpieczeństwa zależy przede wszystkim od zdolności wszystkich tych barier do zapobiegania eskalacji zdarzenia inicjującego [Kaczorowski, 2014; Wróblewski, 2011].

Przykładem ilustrującym wzajemne oddziaływanie obu rodzajów ryzyka może być awaria układu hamulcowego turbiny podczas prowadzenia prac serwisowych. W pierwszej fazie dochodzi do utraty funkcji bezpieczeństwa przez element techniczny. Następnie pojawia się możliwość niekontrolowanego ruchu wirnika, co powoduje bezpośrednie zagrożenie dla personelu przebywającego wewnątrz gondoli. Jeżeli jednocześnie wystąpią niekorzystne warunki atmosferyczne lub ograniczona możliwość ewakuacji, następuje dalsza eskalacja ryzyka prowadząca do znacznego zwiększenia prawdopodobieństwa ciężkiego wypadku. Analogiczny mechanizm obserwuje się w przypadku awarii instalacji elektrycznej, która może prowadzić do powstania łuku elektrycznego, pożaru gondoli, a następnie konieczności prowadzenia ewakuacji z wysokości. W obu przypadkach zagrożenie zawodowe nie jest zjawiskiem pierwotnym, lecz konsekwencją rozwoju awarii technicznej.

Przeprowadzona analiza prowadzi do wniosku, że klasyczna ocena ryzyka zawodowego koncentruje się przede wszystkim na identyfikacji zagrożeń występujących podczas wykonywania określonych czynności roboczych. Podejście to pozwala skutecznie ograniczać ryzyko wynikające z organizacji pracy, jednak nie obejmuje pełnego procesu rozwoju awarii technicznej oraz jej wpływu na bezpieczeństwo pracowników. Z kolei metody stosowane w inżynierii bezpieczeństwa umożliwiają szczegółową analizę przyczyn uszkodzeń urządzeń, lecz często nie uwzględniają zachowania człowieka, organizacji pracy oraz zmienności środowiska roboczego. Oznacza to, że oba podejścia opisują różne fragmenty tego samego procesu, a ich oddzielne stosowanie może prowadzić do niepełnej identyfikacji zagrożeń [Peng i in., 2023; CIOP-PIB; Kaczorowski, 2014].

Przeprowadzona analiza wskazuje, że efektywne zarządzanie bezpieczeństwem w energetyce wiatrowej wymaga traktowania ryzyka technicznego i zawodowego jako elementów jednego systemu. Szczególne znaczenie ma przy tym identyfikacja zależności pomiędzy uszkodzeniem elementu technicznego, rozwojem scenariusza awaryjnego oraz jego wpływem na bezpieczeństwo personelu. Uzasadnia to opracowanie modelu integrującego analizę niezawodności infrastruktury technicznej z oceną bezpieczeństwa pracy, którego założenia przedstawiono w kolejnej części artykułu.

3. Zintegrowany model oceny ryzyka technicznego i zawodowego

3.1. Założenia modelu

Przeprowadzona analiza zagrożeń technicznych i zawodowych wskazuje, że bezpieczeństwo eksploatacji turbin wiatrowych stanowi rezultat wzajemnego oddziaływania czynników technicznych, organizacyjnych oraz ludzkich. W praktyce eksploatacyjnej nie

występuje wyraźna granica pomiędzy ryzykiem technicznym a ryzykiem zawodowym, ponieważ większość zagrożeń dla pracowników stanowi konsekwencję awarii lub nieprawidłowego funkcjonowania infrastruktury technicznej. Jednocześnie sposób wykonywania czynności eksploatacyjnych wpływa na stan techniczny urządzeń oraz prawdopodobieństwo wystąpienia uszkodzeń. Oznacza to, że skuteczna ocena bezpieczeństwa powinna obejmować zarówno analizę niezawodności systemu technicznego, jak i ocenę zagrożeń występujących podczas wykonywania pracy [Peng i in., 2023; CIOP-PIB].

Norma ISO 31000 wskazuje, że proces zarządzania ryzykiem powinien mieć charakter systemowy i obejmować identyfikację zagrożeń, analizę ryzyka, jego ocenę oraz dobór odpowiednich działań ograniczających. Z kolei norma ISO/IEC 31010 podkreśla, że wybór metody oceny ryzyka powinien być uzależniony od charakteru analizowanego systemu oraz celu prowadzonej analizy, a w praktyce często uzasadnione jest łączenie kilku metod analitycznych w celu uzyskania pełniejszego obrazu zagrożeń [Abgarowicz, 2015].

W świetle powyższych założeń przyjęto, że pojedyncza metoda oceny ryzyka nie pozwala na kompleksową analizę bezpieczeństwa eksploatacji turbin wiatrowych. Klasyczne metody oceny ryzyka zawodowego koncentrują się przede wszystkim na identyfikacji zagrożeń występujących na stanowisku pracy oraz określeniu środków ochrony pracownika. Nie umożliwiają jednak szczegółowej analizy mechanizmów uszkodzeń elementów technicznych ani oceny rozwoju scenariuszy awaryjnych. Z kolei metody wykorzystywane w inżynierii bezpieczeństwa pozwalają identyfikować przyczyny awarii urządzeń, lecz nie uwzględniają w wystarczającym stopniu organizacyjnych i behawioralnych aspektów bezpieczeństwa pracy [Kaczorowski, 2014; Abgarowicz, 2015].

W związku z tym w niniejszym opracowaniu zaproponowano model zintegrowanej oceny ryzyka, którego podstawowym założeniem jest sekwencyjne wykorzystanie trzech wzajemnie uzupełniających się metod analizy bezpieczeństwa. Pierwszym etapem jest identyfikacja potencjalnych uszkodzeń elementów infrastruktury technicznej z wykorzystaniem metody Failure Mode and Effects Analysis (FMEA). Drugim etapem jest analiza możliwych scenariuszy rozwoju zdarzenia niebezpiecznego z zastosowaniem metody Bow-Tie, umożliwiającej określenie zależności pomiędzy zagrożeniem, zdarzeniem inicjującym, barierami zapobiegawczymi oraz konsekwencjami awarii. Ostatni etap obejmuje ocenę akceptowalności uzyskanego poziomu ryzyka zgodnie z zasadą ALARP (As Low As Reasonably Practicable), która umożliwia określenie, czy zidentyfikowane ryzyko zostało ograniczone do poziomu racjonalnie osiągalnego z technicznego i ekonomicznego punktu widzenia [Kaczorowski, 2014; Abgarowicz, 2015].

Dobór metod nie był przypadkowy, lecz wynikał z ich komplementarnego charakteru oraz możliwości objęcia kolejnych etapów procesu oceny ryzyka. Metoda FMEA umożliwia systematyczną identyfikację potencjalnych sposobów uszkodzeń elementów technicznych już na etapie analizy niezawodności. Bow-Tie pozwala następnie przedstawić zależności pomiędzy przyczynami zdarzenia, zdarzeniem krytycznym, barierami bezpieczeństwa oraz jego konsekwencjami, integrując analizę techniczną z oceną bezpieczeństwa pracy. Z kolei zasada ALARP stanowi narzędzie wspomagające ocenę akceptowalności ryzyka oraz podejmowanie decyzji dotyczących wdrażania dodatkowych środków ograniczających zagrożenia.

W opracowaniu nie zdecydowano się na wykorzystanie metod HAZOP, ETA, FTA ani STPA. Metoda HAZOP znajduje zastosowanie przede wszystkim w analizie procesów technologicznych o wysokim stopniu sformalizowania i jest szczególnie przydatna w przemyśle

procesowym. Metody ETA i FTA koncentrują się odpowiednio na analizie następstw zdarzeń inicjujących oraz logicznych zależności prowadzących do awarii, jednak nie umożliwiają jednoczesnej oceny skuteczności barier bezpieczeństwa i ich wpływu na bezpieczeństwo pracowników w sposób charakterystyczny dla diagramu Bow-Tie. Z kolei metoda STPA opiera się na teorii systemów sterowania i jest przeznaczona przede wszystkim do analizy złożonych systemów cyberfizycznych oraz interakcji pomiędzy elementami sterowania. Z uwagi na koncepcyjny charakter niniejszego opracowania oraz jego ukierunkowanie na integrację oceny ryzyka technicznego i zawodowego uznano, że połączenie metod FMEA, Bow-Tie oraz zasady ALARP zapewnia najbardziej spójny i praktyczny model analizy bezpieczeństwa w warunkach eksploatacji turbin wiatrowych.

W ocenie autora zasadniczą zaletą proponowanego rozwiązania jest możliwość zachowania ciągłości procesu analitycznego. Wyniki uzyskane podczas identyfikacji potencjalnych uszkodzeń metodą FMEA stanowią dane wejściowe do opracowania scenariuszy Bow-Tie, natomiast rezultaty analizy barier bezpieczeństwa mogą zostać bezpośrednio wykorzystane podczas oceny akceptowalności ryzyka zgodnie z zasadą ALARP. Ogranicza to ryzyko powielania analiz wykonywanych niezależnie przez służby utrzymania ruchu i specjalistów ds. bezpieczeństwa pracy oraz umożliwia prowadzenie jednolitej dokumentacji procesu zarządzania ryzykiem.

Na podstawie przeprowadzonej analizy przyjęto, że zintegrowany model oceny ryzyka powinien spełniać następujące założenia:

- obejmować zarówno ryzyko techniczne, jak i ryzyko zawodowe;
- umożliwiać identyfikację źródeł zagrożeń już na etapie potencjalnych uszkodzeń urządzeń;
- uwzględniać rozwój scenariuszy awaryjnych oraz wzajemne zależności pomiędzy zagrożeniami;
- pozwalać na ocenę skuteczności istniejących barier technicznych, organizacyjnych i proceduralnych;
- wspierać podejmowanie decyzji dotyczących dalszego ograniczania ryzyka zgodnie z zasadą ALARP.

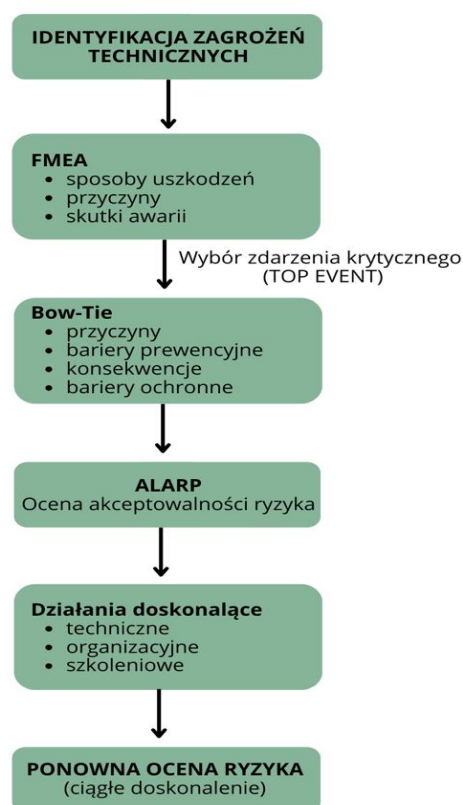
Przyjęte założenia stanowią podstawę opracowanego modelu zintegrowanej oceny ryzyka technicznego i zawodowego, którego kolejne etapy przedstawiono w następnym podrozdziale.

3.2. Integracja metod fmea, bow-tie oraz zasady alarp

Podstawowym założeniem opracowanego modelu jest wykorzystanie komplementarnych właściwości trzech metod analizy ryzyka, które opisują kolejne etapy rozwoju zdarzenia niebezpiecznego. Metoda FMEA umożliwia identyfikację potencjalnych sposobów uszkodzenia elementów technicznych oraz ocenę ich wpływu na funkcjonowanie całego systemu. Metoda Bow-Tie pozwala na odwzorowanie przebiegu zdarzenia awaryjnego, począwszy od przyczyn jego wystąpienia, poprzez zdarzenie krytyczne, aż do możliwych konsekwencji oraz funkcjonujących barier bezpieczeństwa. Z kolei zasada ALARP stanowi narzędzie oceny, czy poziom zidentyfikowanego ryzyka został ograniczony do poziomu racjonalnie osiągalnego z technicznego, organizacyjnego i ekonomicznego punktu widzenia [Kaczorowski, 2014; Abgarowicz, 2015].

Przyjęcie sekwencyjnego wykorzystania wskazanych metod wynika z faktu, że każda z nich opisuje odmienny aspekt bezpieczeństwa systemu. Analiza FMEA odpowiada na pytanie, co może ulec uszkodzeniu oraz jakie będą skutki awarii. Metoda Bow-Tie umożliwia określenie, w jaki sposób awaria może rozwinąć się w zdarzenie niebezpieczne oraz jakie bariery mogą przerwać ten proces. Natomiast zasada ALARP pozwala ocenić, czy po zastosowaniu wszystkich dostępnych środków ochronnych poziom ryzyka pozostaje akceptowalny. Dopiero łączne zastosowanie tych metod umożliwia kompleksową ocenę bezpieczeństwa eksploatacji turbiny wiatrowej.

Na rysunku 1 przedstawiono schemat proponowanego modelu integracji metod FMEA, Bow-Tie oraz zasady ALARP. Model obrazuje sekwencję poszczególnych etapów oceny ryzyka oraz zależności pomiędzy zastosowanymi metodami, prowadzące od identyfikacji potencjalnych uszkodzeń elementów technicznych do oceny akceptowalności ryzyka i doboru działań doskonalących.



Rysunek 1. Zintegrowany model oceny ryzyka technicznego i zawodowego oparty na metodach FMEA, Bow-Tie oraz zasadzie ALARP

Źródło: opracowanie własne.

Pierwszy etap modelu obejmuje analizę elementów infrastruktury technicznej z wykorzystaniem metody FMEA. Zgodnie z normą IEC 60812 analizie poddawane są wszystkie komponenty mające istotny wpływ na bezpieczeństwo eksploatacji, w szczególności łopaty wirnika, przekładnia, generator, układ hamulcowy, układ nastawiania łopat, układ orientacji

gondoli, instalacja elektryczna oraz system sterowania. Dla każdego elementu określone są potencjalne sposoby uszkodzenia, ich przyczyny, możliwe skutki oraz wpływ na funkcjonowanie turbiny. Wyniki analizy umożliwiają wskazanie elementów wymagających pogłębionej oceny bezpieczeństwa [Abgarowicz, 2015].

Drugim etapem jest opracowanie scenariusza Bow-Tie dla każdego istotnego sposobu uszkodzenia zidentyfikowanego podczas analizy FMEA. W przeciwieństwie do klasycznej analizy awaryjności, metoda Bow-Tie nie koncentruje się wyłącznie na samym uszkodzeniu urządzenia, lecz przedstawia pełny przebieg zdarzenia – od zagrożenia i przyczyn jego wystąpienia, poprzez zdarzenie krytyczne (Top Event), aż do możliwych konsekwencji dla ludzi, środowiska oraz infrastruktury technicznej. Istotnym elementem modelu jest jednoczesna identyfikacja barier prewencyjnych ograniczających prawdopodobieństwo wystąpienia zdarzenia oraz barier ochronnych minimalizujących jego skutki. Takie podejście umożliwia ocenę odporności całego systemu bezpieczeństwa, a nie jedynie pojedynczego elementu technicznego [Kaczorowski, 2014; Wróblewski, 2011].

W proponowanym modelu szczególne znaczenie przypisano klasyfikacji barier bezpieczeństwa. Przyjęto ich podział na trzy grupy: bariery techniczne, organizacyjne oraz ludzkie. Do pierwszej grupy zaliczono między innymi układy hamulcowe, zabezpieczenia elektryczne, systemy wykrywania pożaru oraz systemy monitorowania stanu technicznego. Bariery organizacyjne obejmują procedury eksploatacyjne, system zezwoleń na pracę, procedury Lockout–Tagout oraz planowanie prac serwisowych. Trzecią kategorię stanowią bariery związane z kompetencjami personelu, obejmujące kwalifikacje zawodowe, szkolenia specjalistyczne, ćwiczenia ewakuacyjne oraz nadzór nad wykonywanymi pracami. Taki podział pozwala na kompleksową ocenę skuteczności funkcjonującego systemu zarządzania bezpieczeństwem.

Ostatnim etapem modelu jest ocena akceptowalności ryzyka zgodnie z zasadą ALARP. Koncepcja ta zakłada, że całkowite wyeliminowanie ryzyka w złożonych systemach technicznych jest praktycznie niemożliwe, natomiast obowiązkiem organizacji jest jego ograniczenie do poziomu możliwie najniższego, przy zachowaniu racjonalności technicznej i ekonomicznej podejmowanych działań. Ocenie podlega zatem nie tylko poziom ryzyka po zastosowaniu istniejących zabezpieczeń, ale również możliwość wdrożenia dodatkowych środków ograniczających ryzyko. Jeżeli możliwe jest zastosowanie skutecznych rozwiązań technicznych lub organizacyjnych bez ponoszenia nieproporcjonalnych kosztów, ryzyko nie powinno zostać uznane za akceptowalne [Kaczmarek, 2010].

Analiza wyników uzyskanych w poszczególnych etapach modelu pozwala na sformułowanie rekomendacji dotyczących doskonalenia systemu bezpieczeństwa. W zależności od charakteru zidentyfikowanych zagrożeń działania te mogą obejmować modernizację elementów technicznych, zmianę procedur eksploatacyjnych, zwiększenie częstotliwości kontroli diagnostycznych, wdrożenie nowych systemów monitorowania stanu technicznego lub rozszerzenie programu szkoleń personelu. Opracowany model ma zatem charakter iteracyjny – każda zmiana wprowadzona do systemu bezpieczeństwa powinna skutkować ponowną analizą ryzyka i oceną skuteczności zastosowanych rozwiązań.

Sekwencyjne powiązanie etapów modelu ogranicza potrzebę prowadzenia odrębnych analiz przez służby utrzymania ruchu i specjalistów ds. bezpieczeństwa pracy oraz umożliwia tworzenie jednolitej dokumentacji zarządzania ryzykiem. Przedstawiony algorytm stanowi podstawę zastosowania modelu podczas eksploatacji farm wiatrowych.

3.3. Przykład zastosowania modelu

W celu zobrazowania sposobu funkcjonowania zaproponowanego modelu przeprowadzono analizę przykładowego scenariusza obejmującego awarię układu hamulcowego turbiny wiatrowej podczas wykonywania planowych prac serwisowych wewnątrz gondoli. Wybór tego scenariusza wynika z faktu, że układ hamulcowy należy do elementów mających kluczowe znaczenie dla bezpieczeństwa eksploatacji turbiny, natomiast jego niesprawność może prowadzić zarówno do uszkodzenia infrastruktury technicznej, jak i do bezpośredniego zagrożenia życia lub zdrowia pracowników [Peng i in., 2023; Głogowski i in., 2017; Abgarowicz, 2015].

W pierwszym etapie zastosowano metodę FMEA do identyfikacji potencjalnych sposobów uszkodzenia układu hamulcowego. Na podstawie literatury oraz zaleceń normy IEC 60812 uwzględniono zużycie elementów ciernych, nieszczelność układu hydraulicznego, uszkodzenie siłownika hamulca oraz niesprawność układu sterowania. Ich potencjalnym skutkiem jest utrata zdolności zatrzymania wirnika lub niekontrolowane zwolnienie hamulca podczas prac konserwacyjnych [Abgarowicz, 2015]. Wyniki kolejnych etapów analizy przedstawiono syntetycznie w tabeli 1.

Tabela 2. Zastosowanie zintegrowanego modelu oceny ryzyka dla przykładowej awarii układu hamulcowego turbiny wiatrowej

Etap modelu	Zakres analizy	Wynik
FMEA	Identyfikacja potencjalnych uszkodzeń	Zużycie elementów ciernych, nieszczelność układu hydraulicznego, awaria siłownika, uszkodzenie układu sterowania
FMEA	Ocena skutków awarii	Utrata funkcji hamowania wirnika, możliwość niekontrolowanego ruchu wirnika
Bow-Tie	Zdarzenie krytyczne (Top Event)	Utrata funkcji hamowania wirnika
Bow-Tie	Główne przyczyny	Zużycie eksploatacyjne, niewłaściwa konserwacja, awaria hydrauliki, uszkodzenie sterownika
Bow-Tie	Bariery prewencyjne	Przeglądy techniczne, diagnostyka, procedura Lockout–Tagout, kontrola układów sterowania
Bow-Tie	Konsekwencje	Niekontrolowany obrót wirnika, uszkodzenie turbiny, zagrożenie dla personelu
Bow-Tie	Bariery ochronne	Blokada wirnika, procedury ewakuacji, środki ochrony indywidualnej, system komunikacji awaryjnej
ALARP	Ocena ryzyka	Ryzyko wymaga dalszego ograniczenia
ALARP	Działania doskonalące	Diagnostyka predykcyjna, zwiększenie częstotliwości kontroli, monitoring stanu technicznego, dodatkowa weryfikacja blokady wirnika

Źródło: opracowanie własne.

W drugim etapie, z wykorzystaniem metody Bow-Tie, za zdarzenie krytyczne przyjęto utratę funkcji hamowania wirnika. Analiza wykazała, że bezpieczeństwo scenariusza zależy zarówno od barier prewencyjnych, takich jak przeglądy techniczne, diagnostyka i procedury

Lockout–Tagout, jak i od barier ograniczających skutki zdarzenia, obejmujących między innymi mechaniczną blokadę wirnika, procedury ewakuacji oraz przygotowanie personelu do ratownictwa wysokościowego [Sowa i in., 2008; Szczerba, 2013].

W ostatnim etapie stwierdzono, że mimo funkcjonowania podstawowych zabezpieczeń ryzyko wymaga dalszego ograniczenia. Zasadne jest w szczególności rozszerzenie diagnostyki predykcyjnej, zwiększenie częstotliwości kontroli elementów hydraulicznych, wykorzystanie systemów monitorowania stanu technicznego oraz weryfikowanie skuteczności blokady wirnika przed rozpoczęciem prac. Środki te odpowiadają zasadzie ALARP, ponieważ umożliwiają dalsze ograniczenie ryzyka bez ponoszenia nieproporcjonalnych kosztów [Kaczmarek, 2010].

Istotną zaletą proponowanego podejścia jest możliwość identyfikacji punktów krytycznych systemu bezpieczeństwa, których uszkodzenie prowadzi jednocześnie do wzrostu ryzyka technicznego i zawodowego. W analizowanym scenariuszu takim punktem jest układ hamulcowy, którego sprawność warunkuje bezpieczeństwo personelu i eksploatacji turbiny. Umożliwia to ukierunkowanie działań prewencyjnych na elementy mające największy wpływ na całkowity poziom ryzyka.

Przedstawiony przykład ma charakter ilustracyjny i pokazuje sposób zastosowania modelu do wybranego scenariusza awaryjnego. Zaproponowana procedura może zostać wykorzystana również w odniesieniu do innych elementów infrastruktury farm wiatrowych, w szczególności układów nastawiania łopat, przekładni, generatorów, instalacji elektrycznych oraz systemów sterowania. Model może być stosowany zarówno na etapie projektowania nowych instalacji, jak i podczas eksploatacji istniejących farm wiatrowych, wspierając decyzje dotyczące utrzymania ruchu i zarządzania bezpieczeństwem.

4. Wnioski końcowe

Bezpieczeństwo eksploatacji turbin wiatrowych wymaga łącznego uwzględnienia niezawodności infrastruktury technicznej, organizacji pracy oraz czynnika ludzkiego. Awarie urządzeń mogą inicjować zagrożenia dla personelu, natomiast sposób wykonywania czynności eksploatacyjnych wpływa na stan techniczny infrastruktury. Uzasadnia to systemowe podejście do zarządzania ryzykiem technicznym i zawodowym.

Przeprowadzony przegląd literatury oraz analiza dostępnych metod oceny ryzyka wskazują, że stosowane obecnie rozwiązania koncentrują się najczęściej na wybranych aspektach bezpieczeństwa. Metody wykorzystywane w systemach zarządzania bezpieczeństwem i higieną pracy umożliwiają identyfikację zagrożeń związanych z wykonywaniem określonych czynności roboczych, natomiast metody inżynierii bezpieczeństwa pozwalają na szczegółową analizę niezawodności urządzeń oraz mechanizmów prowadzących do rozwoju awarii. Rozdzielenie tych dwóch perspektyw powoduje jednak, że proces oceny ryzyka nie odzwierciedla w pełni rzeczywistych zależności występujących podczas eksploatacji turbin wiatrowych.

Przedstawiony w artykule model integrujący metody FMEA, Bow-Tie oraz zasadę ALARP stanowi próbę przezwyciężenia wskazanej luki. Zasadniczą wartością proponowanego rozwiązania jest zachowanie ciągłości procesu analitycznego – od identyfikacji potencjalnych uszkodzeń elementów technicznych, poprzez analizę scenariuszy rozwoju zdarzeń niebezpiecznych i ocenę skuteczności barier bezpieczeństwa, aż do określenia akceptowalności ryzyka oraz wyboru działań doskonalących. Takie podejście umożliwia prowadzenie spójnej oceny bezpieczeństwa obejmującej zarówno infrastrukturę techniczną, jak i środowisko pracy

człowieka. W odróżnieniu od podejść analizujących ryzyko techniczne i zawodowe odrębnie, proponowany model umożliwia identyfikację zależności przyczynowo-skutkowych pomiędzy uszkodzeniami infrastruktury technicznej, rozwojem scenariuszy awaryjnych oraz zagrożeniami dla personelu. Stanowi to główną wartość dodaną przedstawionej koncepcji.

W ocenie autora praktyczne znaczenie proponowanego modelu wykracza poza sam proces identyfikacji zagrożeń. Integracja analiz prowadzonych dotychczas niezależnie przez służby utrzymania ruchu oraz specjalistów ds. bezpieczeństwa i higieny pracy może przyczynić się do zwiększenia skuteczności działań prewencyjnych, bardziej efektywnego planowania czynności serwisowych oraz racjonalizacji decyzji dotyczących modernizacji infrastruktury technicznej. W konsekwencji możliwe staje się ograniczenie zarówno prawdopodobieństwa wystąpienia awarii, jak i ryzyka wypadków przy pracy, przy jednoczesnym zwiększeniu niezawodności funkcjonowania farm wiatrowych.

Należy podkreślić, że przedstawiony model ma charakter koncepcyjny i został opracowany na podstawie krytycznej analizy literatury, obowiązujących norm oraz metod oceny ryzyka wykorzystywanych w inżynierii bezpieczeństwa. Z tego względu zaprezentowane rozwiązanie wymaga dalszej weryfikacji empirycznej w warunkach rzeczywistej eksploatacji farm wiatrowych. Kierunek dalszych badań powinien obejmować walidację modelu z wykorzystaniem danych eksploatacyjnych, analizę rzeczywistych zdarzeń awaryjnych oraz ocenę skuteczności proponowanego podejścia w praktyce zarządzania bezpieczeństwem. Zaprezentowany w artykule przykład zastosowania modelu pełni wyłącznie funkcję ilustracyjną i nie stanowi jego walidacji w warunkach rzeczywistej eksploatacji farm wiatrowych. Walidacja powinna zostać przeprowadzona z wykorzystaniem rzeczywistych danych eksploatacyjnych pochodzących z farm wiatrowych, co umożliwi ocenę skuteczności modelu w identyfikacji zagrożeń oraz jego przydatności w procesach zarządzania bezpieczeństwem.

Uzyskane wyniki pozwalają stwierdzić, że integracja oceny ryzyka technicznego i zawodowego stanowi uzasadniony kierunek rozwoju metod zarządzania bezpieczeństwem w sektorze energetyki wiatrowej. Wraz ze wzrostem stopnia automatyzacji instalacji, rozwojem technologii monitorowania stanu technicznego oraz zwiększaniem skali inwestycji w odnawialne źródła energii znaczenie kompleksowych modeli oceny ryzyka będzie systematycznie rosło. Opracowanie metod umożliwiających jednoczesną analizę bezpieczeństwa infrastruktury technicznej i bezpieczeństwa pracy może zatem stanowić jeden z istotnych elementów dalszego rozwoju inżynierii bezpieczeństwa oraz nowoczesnych systemów zarządzania ryzykiem w energetyce. Jednocześnie proponowany model może stanowić punkt wyjścia do opracowania bardziej zaawansowanych narzędzi wspomagających podejmowanie decyzji w zakresie utrzymania ruchu oraz zarządzania bezpieczeństwem, wykorzystujących dane eksploatacyjne, systemy monitorowania stanu technicznego oraz rozwiązania oparte na sztucznej inteligencji.

Bibliografia:

1. ABGAROWICZ G. (red.), *Pamięć przyszłości. Analiza ryzyka dla zarządzania kryzysowego*, Wydawnictwo CNBOP-PIB, Józefów 2015
2. BURTON T., SHARPE D., JENKINS N., BOSSANYI E., *Wind Energy Handbook*, John Wiley & Sons Ltd, Chichester 2001.

3. CUNHA L., SILVA D., MACEDO M., Different Shades of Green: An Analysis of the Occupational Health and Safety Risks Faced by Wind Farm Workers, *Sustainability*, 2024, t. 16, nr 7.
4. GARBALA K., TOKAJUK A.M., KAŁLAUR K., CYBULKO P., *Klasyfikacja i charakterystyka turbin wiatrowych (silników wiatrowych)*, Aparatura Badawcza i Dydaktyczna, 2020, t. 25, nr 2.
5. GŁOGOWSKI P., ORYMOWSKA J., PILIP K., *Ryzyko uszkodzeń instalacji i urządzeń turbin wiatrowych spowodowanych wyladowaniami atmosferycznymi*, Autobusy. Technika, Eksploatacja, Systemy Transportowe, 2017, nr 12.
6. KACPRZAK A., *Energetyka wiatrowa*, [w:] *Kierunki i perspektywy rozwoju odnawialnych źródeł energii. Wybrane aspekty*, red. A. Gawlak, Wydawnictwo Politechniki Częstochowskiej, Częstochowa 2022.
7. KACZMAREK T.T., *Zarządzanie ryzykiem. Ujęcie interdyscyplinarne*, Wydawnictwo Difin, Warszawa 2010.
8. KACZOROWSKI M., *Konflikty społeczne w energetyce wiatrowej*, Czysta Energia, 2014, nr 7–8.
9. KARCZEWSKI J., *System zarządzania bezpieczeństwem pracy*, ODDK, Gdańsk 2000.
10. KIM S., NAM K., LEE T., KANG D., KIM J.-Y., Development of a Korean Offshore Wind Power HSE Risk Assessment Module Based on Systems Engineering Approach, *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering*, 2024, t. 16.
11. KLIMASZEWSKI M., *Transformacja energetyczna*, Hodowla i Chów Bydła, 2024, nr 11.
12. KNOPPER L.D., OLLSON C., *Health Effects and Wind Turbines: A Review for Renewable Energy Approval (REA) Applications Submitted under Ontario Regulation 359/09*, Stantec Consulting Ltd., Guelph 2011
13. KORADECKA D. (red.), *Bezpieczeństwo i higiena pracy*, CIOP-PIB, Warszawa 2008.
14. KRAUSE M., *Praktyczne aspekty doboru metod oceny ryzyka zawodowego*, Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej. Seria Organizacja i Zarządzanie, 2011, z. 59.
15. KRAUSE M., *Zarys metodyki oceny ryzyka zawodowego w aspekcie analizy metod badań*, Zeszyty Naukowe Wyższej Szkoły Zarządzania Ochroną Pracy w Katowicach, 2016, t. 12, nr 1.
16. ŁUNARSKI J. (red.), *Zarządzanie bezpieczeństwem pracy*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej, Rzeszów 2002.
17. MARTINEZ LUENGO M., KOLIOS A., Failure Mode Identification and End of Life Scenarios of Offshore Wind Turbines: A Review, „*Energies*” 2015, t. 8, nr 8.
18. PENG H., LI S., SHANGGUAN L., FAN Y., ZHANG H., *Analysis of Wind Turbine Equipment Failure and Intelligent Operation and Maintenance Research*, *Sustainability* 2023, t. 15, nr 10.
19. ROMANOWSKA-SŁOMKA I., SŁOMKA A., *Zarządzanie ryzykiem zawodowym*, Tarbonus, Tarnobrzeg 2002.
20. SOWA A., WINCENCIK K., Ochrona przed zagrożeniami stwarzanymi przez prądy udarowe podczas bezpośrednich wyladowań piorunowych w elektrowniach wiatrowych, *Energetyka* 2008.
21. SZCZERBA T., *Elektrownie wiatrowe – systemy elektronicznego nadzoru pracy*, Czysta Energia, 2013, nr 5

22. URACZ P., KAROLEWSKI B., *Modelowanie turbin wiatrowych z wykorzystaniem charakterystyk współczynnika mocy*, Prace Naukowe Instytutu Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych Politechniki Wrocławskiej. Studia i Materiały, 2006, t. 59, nr 26.
23. WĘGRZYN W., *Inżynieria bezpieczeństwa – interdyscyplina czy złudzenia*, Prace Naukowe Akademii im. Jana Długosza w Częstochowie. Technika, Informatyka, Inżynieria Bezpieczeństwa 2013.
24. WIETESKA S., *Ocena ryzyka eksploatacji lądowych elektrowni wiatrowych w Polsce dla potrzeb ich ubezpieczeń od niektórych zdarzeń losowych*, Finanse, Rynki Finansowe, Ubezpieczenia, 2017, nr 1 (85).
25. Worker Health and Safety on Offshore Wind Farms, Special Report 310, Transportation Research Board, National Academies Press, Washington D.C. 2013, online: <https://onlinepubs.trb.org/onlinepubs/sr/sr310.pdf> [dostęp: 23.06.2026].
26. WRÓBLEWSKI R., *Zarządzanie ryzykiem w przedsiębiorstwie*, Zeszyty Naukowe Uniwersytetu Przyrodniczo-Humanistycznego w Siedlcach. Seria: Administracja i Zarządzanie, 2011, nr 17 (90)
27. WYRĘBEK H., *Zarządzanie bezpieczeństwem pracy*, Zeszyty Naukowe Uniwersytetu Przyrodniczo-Humanistycznego w Siedlcach. Seria: Administracja i Zarządzanie, 2012, nr 22 (95).
28. ZAWIESKA W. (red.), *Ryzyko zawodowe. Metodyczne podstawy oceny*, CIOP-PIB, Warszawa 2009.

Wykaz stron internetowych

29. CENTRALNY INSTYTUT OCHRONY PRACY – PAŃSTWOWY INSTYTUT BADAWCZY, BHP – Elektrownie wiatrowe, Warszawa, online: https://www.ciop.pl/CIOPPortalWAR/appmanager/ciop/pl?_nfpb=true&_pageLabel=P30001831335539182278&html_klucz=19558&html_tresc_id=300008556&html_tresc_root_id=300008556 [dostęp: 26.06.2026].
30. European Agency for Safety and Health at Work, Work-related musculoskeletal disorders: prevalence, costs and demographics in the EU. Report, Luxembourg 2019, online: https://www.gmtconsulting.net/_resources/files/GMT-Consulting-Work-related_MSDs_prevalence_costs_and_demographics_in_the_EU_report-.pdf [dostęp: 23.06.2026].

8. ANALIZA MECHANIZMÓW ROZLEWANIA SIĘ MIASTA Z WYKORZYSTANIEM WIELOAGENTOWEGO MODELU URBAN SUITE – SPRAWL EFFECT

Piotr Wąsacz

Uniwersytet Jagielloński

Wydział Geografii i Geologii

ul. Gronostajowa 3a, 30-387 Kraków

E-mail: piotr.wasacz@doctoral.uj.edu.pl

Abstrakt: W artykule przeanalizowano mechanizmy rozlewania się miasta z wykorzystaniem wieloagentowego modelu Urban Suite – Sprawl Effect, opracowanego w środowisku NetLogo. Celem artykułu było badanie mechanizmów rozlewania się miasta przedstawionych w przytoczonym modelu oraz ocena wpływu jego wybranych parametrów na przebieg i wyniki symulacji. Funkcjonowanie modelu zinterpretowano w odniesieniu do urbanizacji, suburbanizacji, dezurbanizacji, reurbanizacji jak i procesu urban sprawl, tj. rozlewania się miast. Następnie, przy użyciu narzędzia BehaviorSpace dostępnego w programie NetLogo, przeprowadzono 240 przebiegów symulacji obejmujących zmiany kąta poszukiwania lokalizacji, cierpliwości agentów, liczebności populacji oraz stopnia wygładzenia atrakcyjności przestrzeni. Wyniki oceniono na podstawie średniej i maksymalnej odległości agentów od centrum oraz liczby pól zajętych przez osiedlonych agentów w 500. ticku symulacji. Najsilniejszy wpływ na rozmieszczenie agentów miał kąt poszukiwania, natomiast niski poziom wygładzenia sprzyjał powstawaniu bardziej rozproszonych i fragmentarycznych układów. Oddziaływanie populacji i cierpliwości miało bardziej złożony, nieliniowy charakter. Uzyskane wyniki wskazują, że proste reguły zachowania agentów oraz zmiany atrakcyjności przestrzeni mogą prowadzić do powstawania złożonych układów przestrzennych. Model ma jednak charakter ilustracyjny, a jego zastosowanie do prognozowania rozwoju konkretnych obszarów miejskich wymagałoby uwzględnienia dodatkowych uwarunkowań oraz kalibracji na podstawie rzeczywistych danych.

1. Wprowadzenie

W artykule przeanalizowano mechanizmy rozlewania się miasta z wykorzystaniem modelu Urban Suite – Sprawl Effect, opracowanego w środowisku NetLogo. Model przedstawia uproszczony proces rozwoju przestrzennego miasta i pozwala obserwować, jak decyzje lokalizacyjne mieszkańców mogą prowadzić do przesuwania się ludności poza centrum, powstawania nowych skupisk oraz rozproszenia zabudowy. Analizowany model ma charakter wieloagentowy (ang. *agent-based model*), czyli stanowi symulację systemu złożonego z autonomicznych jednostek działających według określonych reguł i wchodzących w interakcje ze sobą oraz z otoczeniem. Bonabeau wskazuje, że zachowanie całego układu wynika z decyzji i wzajemnych oddziaływań agentów, natomiast Macal i North podkreślają przydatność tego podejścia do badania systemów złożonych. Modele te pozwalają obserwować zjawiska emergentne, czyli wzorce występujące na poziomie całego systemu, które wyłaniają się z interakcji agentów, mimo że nie zostały bezpośrednio zaprogramowane [Bonabeau, 2002; Macal i North, 2010]. Model nie odwzorowuje konkretnej aglomeracji ani nie służy do prognozowania jej rzeczywistego rozwoju. Pokazuje natomiast, jak stosunkowo

proste reguły zachowania mieszkańców mogą prowadzić do złożonych zmian przestrzennych. Agenci poszukują atrakcyjnych lokalizacji, osiedlają się w nich i wpływają na atrakcyjność otoczenia, co pozwala analizować zależność między decyzjami jednostek a strukturą całego obszaru miejskiego [Felsen i Wilensky, 2007].

Celem artykułu jest analiza mechanizmów rozlewania się miasta przedstawionych w przytoczonym modelu oraz ocena wpływu jego wybranych parametrów na przebieg i wyniki symulacji. Oprócz charakterystyki zasad działania modelu i interpretacji obserwowanych układów przestrzennych przeprowadzono eksperyment w narzędziu BehaviorSpace. Zbadano wpływ parametrów *seeker-search-angle*, *seeker-patience*, *population* i *smoothness* na odległość agentów od centrum oraz liczbę zajętych pól. Pozwoliło to porównać, w jaki sposób wybrane wartości badanych parametrów wiązały się ze skalą przestrzennego rozmieszczenia agentów.

2. Podstawy teoretyczne

Urban sprawl, czyli rozlewanie się miasta, oznacza rozwój zabudowy poza dotychczasowym zwartym obszarem miejskim. Proces ten charakteryzuje się najczęściej niską gęstością zabudowy, jej nieciągłością, rozproszeniem oraz oddalaniem miejsc zamieszkania od centrum miasta. Zagadnienie to jest często analizowane także w kontekście chaosu przestrzennego. Galster i współautorzy zwracają uwagę, że urban sprawl jest zjawiskiem wielowymiarowym [Galster i in., 2001]. Oznacza to, że rozlewanie się miasta nie należy utożsamiać z każdym przypadkiem powiększania jego powierzchni. Miasto może rozwijać się w sposób zwarty poprzez uzupełnianie istniejącej zabudowy albo w sposób rozproszony, prowadzący do powstawania odizolowanych osiedli i zajmowania nowych terenów. Galster i współautorzy wyróżniają osiem wymiarów służących do opisu urban sprawl: gęstość, ciągłość, koncentrację, skupienie zabudowy, centralność, nuklearność, przemieszanie funkcji oraz bliskość elementów struktury miejskiej. Nuklearność należy rozumieć jako stopień, w jakim zabudowa koncentruje się wokół jednego lub kilku wyraźnych ośrodków, natomiast przemieszanie funkcji odnosi się do przestrzennego powiązania zabudowy mieszkaniowej, miejsc pracy oraz usług. O występowaniu urban sprawl może świadczyć określona kombinacja niskich wartości kilku wymiarów. Pojedyncza cecha, na przykład niska gęstość zabudowy, nie jest natomiast wystarczająca do jednoznacznego rozpoznania tego zjawiska. Zabudowa o niewielkiej gęstości może zachowywać ciągłość przestrzenną, natomiast zabudowa o wyższej gęstości może być silnie rozproszona i oddzielona od pozostałych części miasta [Galster i in., 2001]. Do najważniejszych przyczyn tego procesu można zaliczyć między innymi wzrost liczby ludności, zwiększanie się dochodów mieszkańców oraz rozwój transportu, który umożliwia zamieszkanie w większej odległości od centrum. Wraz ze wzrostem zamożności zwiększa się również zapotrzebowanie na większe mieszkania, domy jednorodzinne i działki budowlane. Brueckner podkreśla jednak, że problemem nie jest samo powiększanie się miasta, lecz sytuacja, w której indywidualne decyzje mieszkańców nie uwzględniają kosztów ponoszonych przez całą społeczność, takich jak większe wydatki na infrastrukturę, nadmierna kongestia infrastruktury transportowej czy utrata terenów otwartych [Brueckner, 2000].

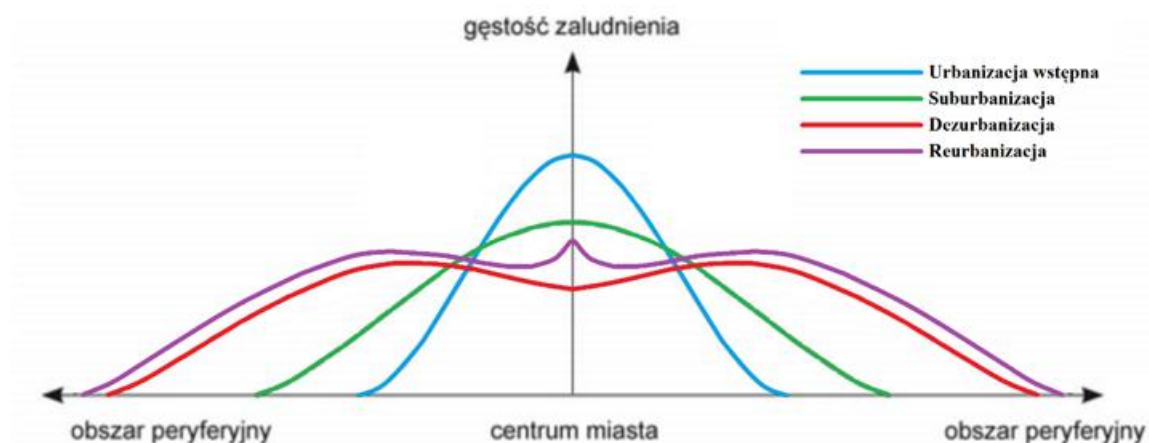
Na złożony charakter tych uwarunkowań wskazują także Oueslati, Alvanides i Garrod. Autorzy przeanalizowali rozwój 282 miast europejskich. Rozróżnili przy tym wzrost

powierzchni terenów zurbanizowanych od fragmentacji zabudowy. Wykazali, że oba procesy mogą wynikać z innych czynników. Wzrost dochodów był silnie związany z przestrzennym powiększaniem się miast. Fragmentacja zależała natomiast od bardziej złożonego układu uwarunkowań, obejmującego między innymi liczbę ludności, koszty dojazdów i wartości gruntów [Oueslati, Alvanides i Garrod, 2015]. W analizowanym modelu tylko część tych czynników została przedstawiona bezpośrednio. Parametr *population* odzwierciedla presję wynikającą z liczby agentów poszukujących miejsca zamieszkania. Pozostałe cechy lokalizacji zostały natomiast ujęte łącznie jako atrakcyjność poszczególnych pól.

Rozproszony rozwój prowadzi do zajmowania terenów otwartych, fragmentacji obszarów przyrodniczych oraz zwiększania powierzchni wymagającej obsługi infrastrukturalnej. Pełna ocena tych skutków jest trudna, gdyż część z nich ma charakter długookresowy i nie może zostać łatwo wyrażona w pieniądzu [Johnson, 2001]. Istotne są również skutki transportowe. Niska gęstość oraz rozproszenie i nieciągłość zabudowy utrudniają efektywną organizację transportu publicznego. Camagni, Gibelli i Rigamonti [2002] wykazali na przykładzie obszaru metropolitalnego Mediolanu, że rozproszone formy rozwoju można powiązać z większym zużyciem terenu oraz większym oddziaływaniem transportu na środowisko. Analizowany model nie przedstawia dróg, środków transportu ani codziennych podróży mieszkańców. Pokazuje jednak układ przestrzenny, który w rzeczywistym mieście może prowadzić do wzrostu odległości i kosztów transportu.

Urban sprawl jest ściśle związany z procesem suburbanizacji, ale należy podkreślić, że oba pojęcia nie są tożsame. Suburbanizacja oznacza przemieszczanie się ludności, zabudowy i funkcji miejskich z centrum ośrodka miejskiego do jego strefy podmiejskiej. Urban sprawl opisuje natomiast przestrzenną formę tego rozwoju. Suburbanizacja może przebiegać w sposób uporządkowany i zwarty, ale może również prowadzić do rozproszonej zabudowy charakterystycznej dla urban sprawl. W Polsce suburbanizacja najsilniej zaznacza się w strefach otaczających duże miasta, choć występuje również wokół ośrodków średnich i małych. Jej rozwój wiąże się z napływem migracyjnym do gmin podmiejskich, wzrostem liczby ich mieszkańców oraz intensywnym rozwojem budownictwa mieszkaniowego. Osoby przenoszące miejsce zamieszkania na przedmieścia nadal pozostają związane z miastem centralnym poprzez dojazdy do pracy i szkół oraz korzystanie z usług zlokalizowanych w mieście centralnym. Ekspansji zabudowy często towarzyszy również przeznaczanie gruntów rolnych na cele mieszkaniowe [Śleszyński i in., 2021; Koliński, 2024].

Rozwój obszaru miejskiego można przedstawić za pomocą kilku podstawowych faz. Pierwszą jest urbanizacja, czyli koncentracja ludności i funkcji w mieście centralnym. Następnie może wystąpić suburbanizacja, podczas której rozwój przenosi się do strefy podmiejskiej. Kolejnym etapem jest dezurbanizacja lub kontrurbanizacja, oznaczająca przemieszczanie się ludności jeszcze dalej, poza bezpośrednią strefę miejską. Reurbanizacja wiąże się natomiast z ponownym wzrostem znaczenia centrum miasta i powrotem części mieszkańców do jego wewnętrznych obszarów [Heffner, 2016] (Ryc. 1.).



Rycina 1. Fazy urbanizacji

Źródło: <https://geografia24.pl/urbanizacja/>.

Fazy te nie muszą występować w ścisłej kolejności. W jednym regionie miejskim może jednocześnie trwać rozwój przedmieść i ponowne ożywienie niektórych dzielnic centralnych. Model NetLogo pozwala zaobserwować podobną zmienność, ponieważ agenci mogą opuszczać centrum, przemieszczać się na peryferie, a następnie wracać do wcześniej mniej intensywnie wykorzystywanych obszarów.

3. Charakterystyka modelu

Przedmiotowy model wykorzystuje podejście wieloagentowe. Oznacza to, że układ przestrzenny jest kształtowany przez zachowania wielu zaprogramowanych jednostek. Każdy agent działa samodzielnie na podstawie lokalnych informacji, ale pośrednio oddziałuje z innymi agentami poprzez zmiany atrakcyjności przestrzeni. Dopiero suma tych decyzji prowadzi do powstania określonego układu przestrzennego. Takie podejście może być przydatne w analizie zmian użytkowania ziemi, ponieważ pozwala połączyć cechy terenu z decyzjami mieszkańców. Warunki przestrzenne wpływają na zachowania agentów, natomiast działalność agentów modyfikuje samą przestrzeń. Powstaje więc swoiste sprzężenie zwrotne między mieszkańcami a środowiskiem, w którym się poruszają [Parker, Manson, Janssen, Hoffmann i Deadman, 2003].

Przestrzeń modelu składa się z pól (ang. *patches*), z których każde ma określony poziom atrakcyjności. Atrakcyjność można interpretować jako syntetyczny odpowiednik takich cech lokalizacji jak dostępność transportowa, ceny nieruchomości, jakość środowiska, dostęp do usług i prestiż.

Na początku symulacji wszyscy agenci znajdują się w centrum mapy. Ich początkowe skupisko można interpretować jako uproszczony odpowiednik zwartego rdzenia miejskiego. Agenci występują w dwóch stanach. Agenci mogą występować w dwóch stanach: *seeker*, oznaczającym agenta poszukującego lokalizacji, oraz *house*, oznaczającym agenta czasowo osiedlonego. Agent poruszający się po mapie porównuje atrakcyjność kilku pól znajdujących się w jego najbliższym otoczeniu. Kieruje się w stronę korzystniejszego obszaru, ale jego decyzja nie jest całkowicie przewidywalna, ponieważ zawiera pewien element losowości.

Agent nie posiada informacji o sytuacji całej przestrzeni. Nie wybiera on więc najlepszego możliwego miejsca na całej mapie, lecz podejmuje decyzję na podstawie ograniczonej informacji. Można to interpretować jako uproszczone odzwierciedlenie rzeczywistych decyzji mieszkaniowych, w których ludzie nie dysponują pełną wiedzą o wszystkich dostępnych lokalizacjach.

Po osiedleniu agent pozostaje w wybranym miejscu przez określony czas. Jego obecność zwiększa atrakcyjność tego obszaru. Można to interpretować jako uproszczony odpowiednik rozwoju infrastruktury i usług, poprawy dostępności transportowej lub wzrostu zainteresowania daną lokalizacją. W rezultacie miejsca już wybierane przez mieszkańców stają się jeszcze bardziej atrakcyjne i przyciągają kolejne osoby. Atrakcyjność nie zwiększa się jednak bez ograniczeń. Po przekroczeniu progu równego dwukrotności wartości *max-attraction* atrakcyjność pola zostaje jednak gwałtownie wyzerowana. Mechanizm ten można interpretować jako efekt zatłoczenia, przeciążenia infrastruktury, wzrostu cen nieruchomości, pogorszenia warunków środowiskowych lub pogorszenia warunków życia. Agenci mogą wtedy rozpocząć poszukiwanie nowych lokalizacji.

4. Kolory i parametry modelu

Kolory pól przedstawiają poziom ich atrakcyjności. Obszary czarne lub ciemnozielone mają niewielką atrakcyjność. Pola o średniej atrakcyjności są zielone, natomiast obszary jasnozielone lub niemal białe są najbardziej atrakcyjne. Kolor nie pokazuje rodzaju zabudowy, ale aktualną ocenę danego terenu z perspektywy mieszkańców (agentów).

Agenci poszukujący lokalizacji są oznaczeni jasnoniebieskimi symbolami. Po osiedleniu przyjmują postać niebieskiego domu. Dzięki temu można obserwować, które jednostki pozostają w ruchu, a które czasowo zajęły określoną lokalizację.

Parametr *population* określa liczbę agentów. Jego zwiększenie prowadzi do większej liczby jednoczesnych decyzji i szybszych zmian atrakcyjności przestrzeni. Przy dużej populacji zabudowa rozwija się bardziej dynamicznie, a poszczególne obszary szybciej osiągają wysoki poziom wykorzystania.

Parametr *smoothness* odpowiada za stopień wygładzenia początkowego rozkładu atrakcyjności. Przy małej wartości mapa jest silnie zróżnicowana i przypomina mozaikę pojedynczych atrakcyjnych i nieatrakcyjnych pól. Może to sprzyjać powstawaniu odizolowanych skupisk. Wysoka wartość tworzy większe i bardziej jednolite obszary, przez co rozwój może przebiegać w sposób bardziej ciągły.

Zmienna *max-attraction* określa skalę atrakcyjności przestrzeni. Wpływa zarówno na wartości początkowe, jak i na skłonność agentów do osiedlenia się.

Parametr *seeker-search-angle* określa zakres obserwacji agenta. Przy małej wartości agent porusza się bardziej konsekwentnie w dotychczasowym kierunku. Większy kąt umożliwia reagowanie na atrakcyjne pola położone po bokach dotychczasowego kierunku ruchu, ale może również powodować bardziej nieregularny ruch.

Parametr *seeker-patience* oznacza czas, przez jaki agent jest gotowy poszukiwać odpowiedniej lokalizacji. Niska wartość prowadzi do szybkiego osiedlania się, często w pobliżu centrum. Wysoka wartość umożliwia dalszą wędrówkę, przez co zwiększa się prawdopodobieństwo powstawania zabudowy na peryferiach.

Parametr wait-between-seeking określa czas pozostawania w wybranej lokalizacji. Im większa jest jego wartość, tym dłużej agent wpływa na atrakcyjność danego miejsca. Sprzyja to utrwalaniu lokalnych skupisk, ale może również prowadzić do szybszego przeciążenia obszaru.

5. Interpretacja przebiegu symulacji

Przed przystąpieniem do interpretacji przebiegu samej symulacji należy podkreślić, iż obserwowane w modelu zmiany rozmieszczenia agentów nie stanowią bezpośredniego odwzorowania rzeczywistych procesów rozwoju miasta oraz rozlewania się zabudowy miejskiej. Model ma charakter uproszczony i przedstawia jedynie wybrane przestrzenne cechy, jak i prawidłowości tych procesów, przede wszystkim koncentrację ludności w centrum, przemieszczanie się w kierunku stref zewnętrznych oraz ponowne pojawianie się agentów w pobliżu pierwotnego rdzenia. Z tego względu poszczególne etapy symulacji należy traktować jako uproszczone analogie urbanizacji, suburbanizacji, dezurbanizacji i reurbanizacji, a nie jako pełne odtworzenie tych zjawisk. W dalszej części można zatem wskazywać, że obserwowane zmiany można interpretować jako uproszczoną analogię określonego procesu, że dany układ przypomina przestrzenną strukturę charakterystyczną dla poszczególnych faz rozwoju obszaru miejskiego.

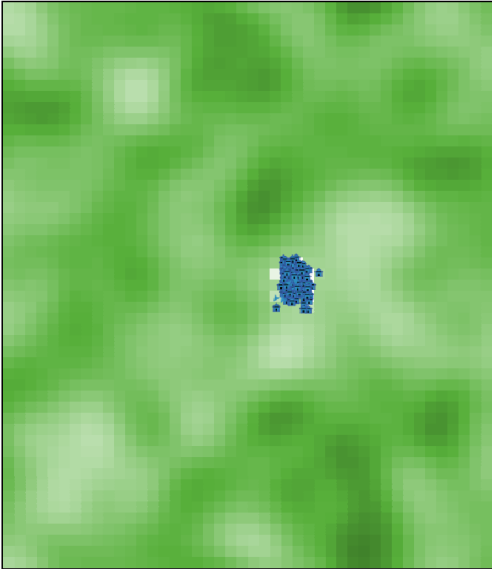
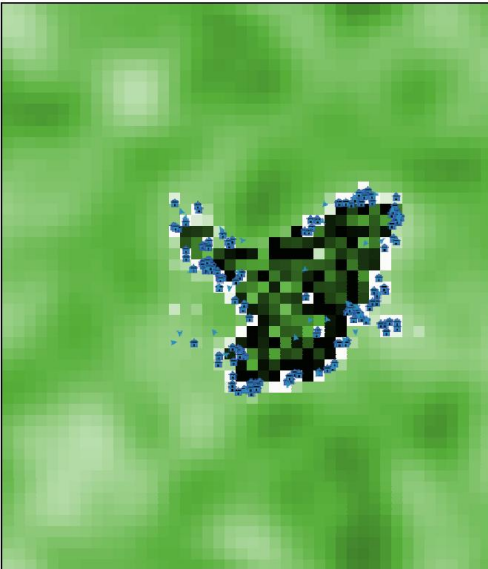
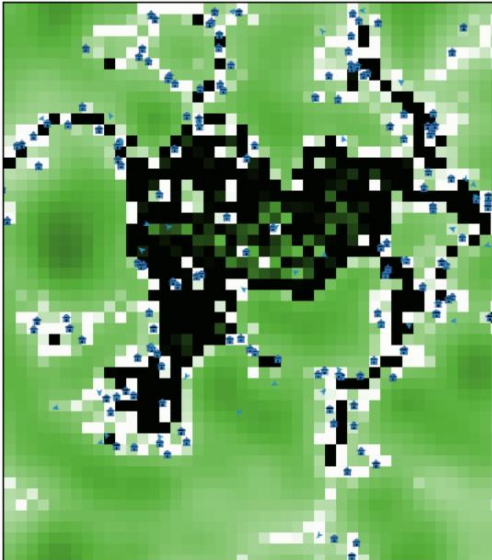
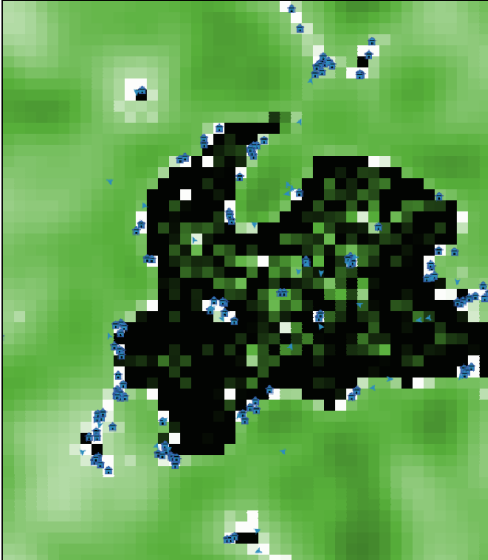
Początkową koncentrację wszystkich agentów w centrum można interpretować jako uproszczone przedstawienie już ukształtowanego, silnie skoncentrowanego rdzenia miejskiego, będącego rezultatem wcześniejszej urbanizacji. Po rozpoczęciu symulacji część mieszkańców opuszcza centrum i przemieszcza się w stronę bardziej atrakcyjnych pól.

Przemieszczanie się części agentów z początkowego rdzenia na pola położone w jego otoczeniu można ostrożnie interpretować jako analogię suburbanizacji. Powstają nowe skupiska położone poza rdzeniem, ale nadal związane z nim przestrzennie. Obecność mieszkańców zwiększa atrakcyjność tych miejsc, dlatego mogą one przyciągać kolejnych agentów.

Niektóre atrakcyjne obszary znajdują się w większej odległości od centrum. Agenci mogą wtedy ominąć tereny o mniejszej atrakcyjności i osiedlić się dalej. Między istniejącą zabudową a nowym skupiskiem pozostają wolne pola. Jest to przykład zabudowy skokowej, charakterystycznej dla urban sprawl. W przestrzeni powstają odizolowane skupiska, a rozwój miasta traci ciągły charakter. Wraz z dalszym przebiegiem symulacji część agentów przemieszcza się jeszcze dalej od centrum. Dalsze przemieszczanie się części agentów ku bardziej odległym obszarom może przypominać przestrzenny skutek dezurbanizacji. Zabudowa obejmuje wtedy nie tylko najbliższe przedmieścia, ale również bardziej odległe fragmenty obszaru.

Jednocześnie wcześniej intensywnie wykorzystywane miejsca mogą utracić atrakcyjność. Agenci opuszczają je i poszukują nowych lokalizacji. Po pewnym czasie część z nich może ponownie pojawić się w pobliżu centrum. Ponowne pojawianie się agentów w pobliżu centrum może być interpretowane jako uproszczona analogia reurbanizacji. Centrum, które wcześniej traciło ludność, ponownie zaczyna przyciągać część agentów.

Tabela 1. Fazy przemian obszaru miejskiego i ich przestrzenna interpretacja w modelu NetLogo

Urbanizacja	Suburbanizacja
	
sprawl	Reurbanizacja
	

Źródło: opracowanie własne na podstawie wyników symulacji w modelu Urban Suite – Sprawl Effect w środowisku NetLogo.

Przebieg modelu odpowiada zatem ogólnemu schematowi zmian obszaru miejskiego: początkowej urbanizacji, suburbanizacji, dalszej decentralizacji oraz częściowemu powrotowi mieszkańców do centrum. Należy jednak podkreślić, że procesy te nie są w symulacji wyraźnie od siebie oddzielone. W tym samym czasie jedni agenci mogą przemieszczać się na peryferie, podczas gdy inni wybierają obszary położone bliżej rdzenia (Tab. 1.).

6. Analiza wpływu parametrów modelu

W celu pogłębienia analizy przeprowadzono eksperyment z wykorzystaniem narzędzia BehaviorSpace, które umożliwia wielokrotne uruchamianie modelu dla różnych wartości parametrów oraz automatyczne zapisywanie uzyskanych wyników. Jako ustawienia bazowe

przyjęto: smoothness = 15, max-attraction = 15, population = 200, seeker-search-angle = 84, seeker-patience = 60 oraz wait-between-seeking = 15. Do analizy wybrano cztery parametry, które mogą mieć istotny wpływ na przestrzenne rozmieszczenie agentów: kąt poszukiwania, cierpliwość agentów, liczebność populacji oraz stopień wygładzenia atrakcyjności przestrzeni. Parametry te odnoszą się zarówno do sposobu poruszania się agentów, jak i do warunków początkowych symulacji.

Każdy parametr analizowano oddzielnie dla trzech wartości. W każdym wariancie pozostałe parametry utrzymywano na poziomie bazowym. Pozwoliło to określić wpływ jednej zmiennej bez jednoczesnej zmiany pozostałych elementów modelu. Łącznie zbadano 12 wariantów. Każdy z nich uruchomiono 20 razy ze względu na występujący w modelu element losowości. W sumie przeprowadzono więc 240 przebiegów symulacji, z których każdy trwał 500 ticków (czyli 500 kolejnych kroków działania modelu).

Obszar analizy stanowiła kwadratowa siatka modelu o współrzędnych od –30 do 30 na obu osiach, obejmująca 61×61 pól (*patches*), przy czym każdy przebieg symulacji rozpoczynał się od umieszczenia wszystkich agentów w centrum siatki. Ze względu na losowy charakter inicjalizacji w każdym przebiegu początkowy rozkład atrakcyjności pól był nieco inny. Mimo stałych rozmiarów siatki przestrzenne warunki początkowe poszczególnych symulacji nie były więc identyczne. Wyniki oceniono za pomocą trzech wskaźników. Pierwszym była średnia odległość osiedlonych agentów od centrum, wyrażona w umownych jednostkach przestrzennych siatki modelu, gdzie jedna jednostka odpowiada szerokości jednego pola (ang. *patch*). Drugim wskaźnikiem była największa odległość osiedlonego agenta od centrum w danym uruchomieniu, traktowana jako przybliżona miara skrajnego zasięgu rozmieszczenia agentów. Odległości były mierzone w linii prostej i nie odpowiadają rzeczywistym jednostkom, takim jak metry czy kilometry. Trzecim wskaźnikiem była liczba pól zajętych przez osiedlonych agentów. Wyniki w tabeli stanowią średnią z 20 powtórzeń każdego wariantu.

Tabela 2. Wyniki analizy wpływu parametrów modelu

Analizowany parametr	Wartość parametru	Średnia średnich odległości agentów od centrum	Średnia maksymalnych odległości od centrum	Średnia liczba zajętych pól
seeker-search-angle	30	20,78	40,15	131,85
	84*	7,74	16,55	58,30
	150	4,53	11,65	42,00
seeker-patience	0	0	0	1,00
	60*	7,87	16,67	54,70
	120	8,05	16,09	54,25
population	50	5,62	11,51	21,80
	200*	7,54	15,85	56,50
	750	6,11	17,90	109,80
smoothness	1	10,31	21,46	84,60
	15*	8,12	17,18	55,40
	20	7,84	16,11	55,55

*- wartość bazowa parametru. Źródło: opracowanie własne na podstawie wyników 240 przebiegów symulacji Urban Suite – Sprawl Effect.

Spśród badanych parametrów i w przyjętych zakresach wartości największe różnice analizowanych wskaźników wystąpiły przy zmianie seeker-search-angle. Przy wartości 30 agenci docierali znacznie dalej od centrum. Średnia odległość wyniosła 20,78, a maksymalna 40,15. Zajętych było również ponad dwa razy więcej pól niż w wariancie bazowym. Mały kąt powodował bardziej konsekwentne poruszanie się agentów w dotychczasowym kierunku. Wariant ten charakteryzował się większą średnią odległością, większą średnią z maksymalnych odległości oraz większą liczbą zajętych pól, co wskazuje na bardziej rozległe rozmieszczenie agentów. Przy wartości 150 wszystkie trzy wskaźniki były natomiast niższe.

W przypadku seeker-patience wartość 0 była wariantem granicznym. Agenci praktycznie nie oddalali się od miejsca początkowego, dlatego zajmowali średnio tylko jedno pole. Przy bazowej wartości 60 nastąpiło wyraźne zwiększenie przestrzennego zasięgu rozmieszczenia agentów w porównaniu z wariantem seeker-patience = 0. Dalszy wzrost parametru do 120 nie przyniósł jednak większych zmian. Średnia odległość oraz liczba zajętych pól były niemal takie same jak przy wartości bazowej. Oznacza to, że dodatnia cierpliwość umożliwia agentom poszukiwanie nowych lokalizacji, ale jej dalsze zwiększanie nie prowadziło do proporcjonalnego wzrostu rozproszenia.

Wzrost population zwiększał przede wszystkim liczbę zajętych pól oraz maksymalny zasięg zabudowy. Przy 50 agentach zajętych było średnio 21,80 pól, natomiast przy 750 agentach już 109,80. Maksymalna odległość wzrosła jednocześnie z 11,51 do 17,90. Średnia odległość nie zwiększała się jednak w sposób liniowy. Najwyższą wartość osiągnęła przy populacji 200. Duża liczba agentów prowadziła więc nie tylko do ekspansji na zewnątrz, ale także do intensywniejszego zajmowania obszarów położonych bliżej centrum.

Wyraźny wpływ miał również parametr smoothness. Przy wartości 1 początkowy układ atrakcyjności był silnie zróżnicowany. W takim wariancie agenci zajmowali średnio 84,60 pól, a ich maksymalna odległość od centrum wynosiła 21,46 jednostek. Sprzyjało to omijaniu mniej atrakcyjnych obszarów i powstawaniu oddzielnych skupisk. Wyniki dla wartości 15 i 20 były już bardzo podobne. Może to wskazywać, że po osiągnięciu określonego poziomu wygładzenia w analizowanym zakresie dalszy wzrost parametru wiązał się jedynie z niewielkimi różnicami wartości średnich.

Przeprowadzona analiza pokazuje, że forma rozwoju w modelu zależy nie tylko od liczby agentów. Duże znaczenie ma także sposób, w jaki poszukują oni miejsca zamieszkania, jak i początkowy rozkład atrakcyjności przestrzeni. Najsilniejszy wpływ miał kąt poszukiwania. Istotne było również niskie wygładzenie atrakcyjności. Wpływ populacji i cierpliwości był bardziej złożony i nie we wszystkich przypadkach miał charakter liniowy.

7. Podsumowanie i wnioski

Przeprowadzona analiza pozwoliła rozpoznać mechanizmy rozlewania się miasta przedstawione przy użyciu modelu Urban Suite – Sprawl Effect oraz ocenić wpływ wybranych parametrów na wyniki symulacji. Model pokazuje, że rozproszona struktura przestrzenna może powstawać jako rezultat wielu indywidualnych decyzji lokalizacyjnych.

Należy podkreślić, iż istotną rolę odgrywa sprzężenie zwrotne między atrakcyjnością terenu a zachowaniem agentów: atrakcyjne miejsca przyciągają mieszkańców, a ich obecność zwiększa zainteresowanie daną lokalizacją, natomiast nadmierne wykorzystanie przestrzeni może prowadzić do spadku atrakcyjności i dalszych przemieszczeń.

Zmiany rozmieszczenia agentów można interpretować jako uproszczone analogie kolejnych faz rozwoju obszaru miejskiego. Początkowa koncentracja w centrum odpowiada urbanizacji, przemieszczanie się do stref zewnętrznych można natomiast interpretować jako analogię suburbanizacji, a powstawanie oddalonych skupisk z powstaniem zabudowy skokowej oraz urban sprawl. Dalsza decentralizacja przypomina dezurbanizację, natomiast ponowne pojawianie się agentów w pobliżu centrum może być utożsamiane z reurbanizacją. Procesy te nie występują jednak jako wyraźnie oddzielone etapy i mogą zachodzić równocześnie.

Wyniki eksperymentu wskazują, że w przyjętych zakresach wartości największe różnice analizowanych wskaźników wystąpiły przy zmianie parametru seeker-search-angle. Mały kąt sprzyjał przemieszczaniu się agentów na większe odległości i zajmowaniu większej liczby pól. Dodatnia wartość seeker-patience umożliwiała rozwój przestrzenny, jednak jej dalsze zwiększenie nie powodowało proporcjonalnego wzrostu rozproszenia. Większa populacja zwiększała głównie liczbę zajętych pól i maksymalny zasięg zabudowy, natomiast skrajnie niska wartość smoothness wiązała się z większym zasięgiem rozmieszczenia agentów i większą liczbą zajętych pól. Wyniki potwierdzają więc, że wpływ parametrów nie zawsze jest liniowy. Tym samym forma rozwoju zależy zarówno od zachowania agentów, jak i od początkowego zróżnicowania przestrzeni.

Model uwzględnia jedynie część rzeczywistych uwarunkowań wpływających na przebieg urban sprawl. Można go rozbudować między innymi o dostępność transportową, czas dojazdu do centrum, ceny nieruchomości, dostęp do usług i miejsc pracy, walory przyrodnicze, ograniczenia planistyczne oraz zróżnicowanie dochodów i preferencji mieszkańców. Owe rozszerzenia pozwoliłoby lepiej wyjaśnić, dlaczego rozwój podmiejski koncentruje się w miejscach łączących niższe ceny gruntów, atrakcyjne otoczenie i dobrą dostępność komunikacyjną miasta centralnego. Wykorzystanie modelu do prognozowania rozwoju konkretnego obszaru wymagałoby jednak jego kalibracji na podstawie rzeczywistych danych przestrzennych.

Bibliografia:

1. Bonabeau, E. (2002). Agent-based modeling: Methods and techniques for simulating human systems. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 99(Suppl. 3), 7280–7287.
2. Brueckner, J. K. (2000). Urban sprawl: Diagnosis and remedies. *International Regional Science Review*, 23(2).
3. Camagni, R., Gibelli, M. C. i Rigamonti, P. (2002). Urban mobility and urban form: The social and environmental costs of different patterns of urban expansion. *Ecological Economics*, 40(2), 199–216.
4. Felsen, M. i Wilensky, U. (2007). NetLogo Urban Suite – Sprawl Effect model, Center for Connected Learning and Computer-Based Modeling, Northwestern University.

5. Galster, G., Hanson, R., Ratcliffe, M. R., Wolman, H., Coleman, S. i Freihage, J. (2001). Wrestling sprawl to the ground: Defining and measuring an elusive concept. *Housing Policy Debate*, 12(4), 681–717.
6. Heffner, K. (2016). Proces suburbanizacji a polityka miejska w Polsce. W: T. Marszał (red.), *Miasto – region – gospodarka w badaniach geograficznych. W stulecie urodzin profesora Ludwika Straszewicza* (s. 75–110). Wydawnictwo Uniwersytetu Łódzkiego.
7. Johnson, M. P. (2001). Environmental impacts of urban sprawl: A survey of the literature and proposed research agenda. *Environment and Planning A*, 33(4).
8. Koliński, K. (2024). Plan ogólny gminy. Potencjalne narzędzie ochrony gruntów rolnych. *Wieś i Rolnictwo*, 2(203), 85–99.
9. Macal, C. M. i North, M. J. (2010). Tutorial on agent-based modelling and simulation. *Journal of Simulation*, 4(3), 151–162.
10. Oueslati, W., Alvanides, S. i Garrod, G. (2015). Determinants of urban sprawl in European cities. *Urban Studies*, 52(9).
11. Parker, D. C., Manson, S. M., Janssen, M. A., Hoffmann, M. J. i Deadman, P. (2003). Multi-agent systems for the simulation of land-use and land-cover change: A review. *Annals of the Association of American Geographers*, 93(2), 314–337.
12. Śleszyński, P., Kowalewski, A., Markowski, T., Legutko-Kobus, P. i Nowak, M. (2020). The contemporary economic costs of spatial chaos: Evidence from Poland. *Land*, 9(7), artykuł 214.
13. Śleszyński, P., Nowak, M. J., Legutko-Kobus, P., Hołuj, A., Lityński, P., Jadach-Sepioło, A. i Blaszkę, M. (2021). Suburbanizacja w Polsce jako wyzwanie dla polityki rozwoju. *Polska Akademia Nauk, Komitet Przestrzennego Zagospodarowania Kraju*.

9. THE BACTERIAL AEROBIOME AS A POTENTIAL BIOINDICATOR OF ENVIRONMENTAL CONDITION AND ANTHROPOGENIC PRESSURE: A LITERATURE REVIEW

Karolina Bis

Kazimierz Wielki University

Faculty of Biological Sciences

Student Scientific Society of the Faculty of Biological Sciences

Al. Ossolińskich 12, 85-093 Bydgoszcz, Poland

E-mail: karolina.bis@student.ukw.edu.pl

Wojciech Lipa

Kazimierz Wielki University

Faculty of Biological Sciences

Department of Microbiology and Immunobiology

Aleja Powstańców Wielkopolskich 10, 85-090 Bydgoszcz, Poland

E-mail: w.lipa@ukw.edu.pl

Marta Małecka-Adamowicz

Kazimierz Wielki University

Faculty of Biological Sciences

Department of Microbiology and Immunobiology

Aleja Powstańców Wielkopolskich 10, 85-090 Bydgoszcz, Poland

E-mail: marmal@ukw.edu.pl

1. Introduction

The bacterial aerobiome of indoor environments is shaped by the continuous interplay among outdoor air, occupants, settled dust, surfaces, and ventilation systems. Human presence increases the emission of airborne bacteria through direct shedding and resuspension, whereas ventilation modifies the relative contributions of indoor and outdoor sources [Hospodsky et al., 2012; Kembel et al., 2012; Meadow et al., 2014; Nazaroff, 2016; Pastuszka, Paw, Lis, Wlazło and Ulfig, 2000; Qian, Hospodsky, Yamamoto, Nazaroff and Peccia, 2012]. Associations among culturable bacterial concentrations, particle concentrations, and room occupancy further indicate that microbial data can provide information on processes occurring inside buildings [Huang, Lee and Shih, 2017; Kim et al., 2024].

The expected microbial signal is facility-specific. Schools are characterised by repeated periods of high-density occupancy, whereas sports halls additionally involve intense physical activity and dust resuspension. Hospitals combine human-derived emissions with filtration, cleaning, and antimicrobial pressure, while offices and other public buildings represent different occupancy–ventilation regimes. The aim of this study was to evaluate the potential of the bacterial aerobiome as a bioindicator of environmental condition and

anthropogenic pressure, with particular emphasis on different types of indoor environments. The review focuses on educational facilities, sports facilities, hospitals and other healthcare-related settings, offices, and public-use buildings, in which airborne bacterial communities may reflect differences in occupancy, human activity, ventilation, resuspension of settled particles, cleaning practices, and other building-specific factors. Particular attention is given to bacterial abundance, taxonomic composition, the occurrence of human-associated and potentially pathogenic taxa, and antimicrobial-resistance characteristics as potential components of a bioindicator framework. The study also considers the methodological and interpretative limitations that currently restrict the use of airborne bacterial communities as routine indicators of indoor environmental quality.

2. Materials and Methods

A structured narrative review was conducted. PubMed, Google Scholar and publishers' databases were searched for publications available up to 11 August 2026 using combinations of “indoor airborne bacteria”, “aerobiome”, “school”, “university”, “sports facility”, “hospital”, “pharmacy”, “office”, “public building”, “Poland”, “occupancy”, “ventilation”, “CO₂”, “particulate matter”, “*Staphylococcus*”, “antibiotic resistance” and “resistome”. Peer-reviewed field studies analysing indoor air were prioritised, especially publications from 2018–2026 and Polish studies; older papers were retained when they provided baseline evidence on indoor/outdoor relationships, resuspension or hospital bioaerosols. The final synthesis comprised 40 publications. Culture-based and molecular results were treated as complementary rather than directly interchangeable.

3. Results and Discussion

3.1. Educational facilities

Higher concentrations during occupied periods, occupant-associated bacterial emissions and resuspension, and seasonal variation have been documented in classroom and day-care studies [Hospodsky et al., 2015; Prussin, Vikram, Bibby and Marr, 2016; Qian et al., 2012]. Molecular studies identified abundant human-associated *Staphylococcus* and *Micrococcus*, while outdoor air remained an important source [Deng et al., 2016; Lee et al., 2021; Lin, Chou, Hsu, Hung and Lai, 2024; Yang, Lee, Park and Yeo, 2022]. Polish studies provide additional support for this interpretation. Schools and nursery schools in different regions repeatedly showed indoor enrichment of Gram-positive cocci and differences associated with room use, season and ventilation [Brągoszewska, Mainka and Pastuszka, 2016a, 2016b; Brągoszewska, Mainka, Pastuszka, Lizończyk and Desta, 2018b; Dumała and Dudzińska, 2013]. Studies from Bydgoszcz additionally evaluated antibiotic resistance among airborne staphylococci [Kubera, Studzińska, Dokładna, Małecka-Adamowicz and Donderski, 2015; Małecka-Adamowicz, Koim-Puchowska and Dembowska, 2020]. Recent work in Białystok additionally demonstrated seasonal and room-specific differences in microbial contamination and the periodic occurrence of airborne staphylococci [Andraka, Andraka, Butarewicz and Hawrylik, 2025]. Thus, in educational facilities the most plausible bioindicator approach is a composite microbial signature linked to occupancy and ventilation rather than a single bacterial species.

3.2. Sports facilities

Sports facilities provide an especially clear activity- and resuspension-related signal. Differences among recreation facilities, schools and homes were already evident in early indoor–outdoor surveys [Jo and Seo, 2005]. In sports facilities in Bydgoszcz, bacterial abundance varied markedly among a swimming pool, a fitness room, a martial arts room, a sports hall and a gym; isolated *Staphylococcus* strains were also tested for antibiotic susceptibility [Małecka-Adamowicz, Kubera, Jankowiak and Dembowska, 2019]. In a secondary-school gymnasium, bacterial aerosol concentrations approximately doubled during physical education classes relative to the pre-activity period [Bragoszewska, Biedroń and Mainka, 2020]. More recent Polish work combined microbial profiles with PM_{2.5} and CO₂ [Szulc, Okrasa, Ryngajłło, Pielech-Przybylska and Gutarowska, 2023], while Manazyle et al. [2026] assessed microbiological and chemical exposures simultaneously. These findings support the use of short-term changes in bacterial concentration, particle load and CO₂ concentration as complementary indicators of room use.

3.3. Hospitals, healthcare rooms and pharmacies

Healthcare environments differ from other public indoor settings because abundance-based measures can be complemented by functional signals related to antimicrobial resistance. Polish hospital studies reported bacterial aerosol concentrations of the order of 10²–10³ CFU/m³, with frequent isolation of *Staphylococcus* and *Micrococcus* [Pastuszka, Marchwińska-Wyrwał and Wlazło, 2005]. Comparable hospital surveys identified *Staphylococcus*, *Micrococcus*, *Corynebacterium* and *Bacillus* as dominant culturable genera [Kim, Kim and Kim, 2010]. Airborne erythromycin- and tetracycline-resistance genes were detected in hospital rooms [Gilbert, Veillette and Duchaine, 2010], and culture-based work has documented broad antibiotic resistance among airborne hospital isolates [Tamsi et al., 2022]. Recent studies extend this pattern. Metagenomic analysis revealed an enriched resistome in inhalable hospital bioaerosols associated with human-associated bacteria [Wu et al., 2022]; ward-specific bacterial bioaerosols varied with environmental conditions [Fernandes, Aguiar, Mendes-Rodrigues and Martins, 2023]; and multidrug-resistant airborne isolates were recovered from hospital particulate matter [Khan et al., 2024]. Further work identified *Bacillus*, *Staphylococcus* and *Pseudomonas* together with resistance genes [Liu et al., 2025], while 16S rRNA gene-based bacterial profiles in hospitals differed between open/semi-open areas and highly filtered rooms [Chatthanathon et al., 2026]. Polish intervention data show that air-treatment systems can modify culturable bacterial concentrations [Pastuszka et al., 2019], and pharmacies may also contain resistant staphylococci [Jankowiak, Kubera, Małecka-Adamowicz and Dembowska, 2020]. In healthcare settings, airborne antibiotic resistance genes (ARGs) and resistance phenotypes are therefore promising functional indicators, but only when interpreted together with culturable bacterial counts, room function and filtration.

3.4. Offices and other public-use buildings

In an office building in Gliwice, indoor air contained human-associated *Micrococcus* and staphylococci, whereas *Bacillus* was more characteristic of outdoor air; concentrations also differed with ventilation mode [Bragoszewska, Biedroń, Kozielska and Pastuszka,

2018a]. Across public buildings, total airborne bacterial concentrations were associated with occupancy density and CO₂ concentrations [Lee, Lee, Kim, Shim and Yeo, 2024]. Recent Polish measurements in schools, universities, a pharmacy and a clinic showed that culture and qPCR can yield substantially different abundance estimates [Kryger, Maćkowska, Kortus, Koczura and Mokracka, 2026]. This confirms that any proposed bioindicator framework must be method-specific and should preferably include an indoor/outdoor comparison (Table 1).

Table 1. Facility-specific bacterial signals and their potential bioindicator interpretation

Facility type	Frequently reported bacterial signal	Potential bioindicator interpretation
Schools/ Universities	Human-associated <i>Staphylococcus</i> and <i>Micrococcus</i> ; occupancy-dependent total counts	Occupancy, ventilation efficiency and resuspension.
Sports facilities	Short-term rise in bacterial aerosol during activity; staphylococci; association with particles/CO ₂	Intensity of use, human emission and dust resuspension.
Hospitals/ Pharmacies	<i>Staphylococcus</i> , <i>Corynebacterium</i> , <i>Bacillus</i> , <i>Pseudomonas</i> ; resistant isolates and ARGs	Room function, filtration and antimicrobial pressure.
Offices/Public buildings	Mixture of human-associated and outdoor taxa; differences by ventilation and occupancy density	Balance between occupancy-related emission and outdoor-air supply.

Source: authors’ own compilation based on the literature reviewed.

3.5. Bioindicator potential and limitations

Taken together, the literature supports bacterial aerobiomes as complementary indicators of indoor processes, not as universal indicators of health risk. Human-associated taxa may indicate occupancy and shedding, while spore-forming or soil-associated bacteria may indicate outdoor input or dust. However, *Staphylococcus* occurs in schools, sports facilities, offices and hospitals, so its presence alone is non-specific. The same applies to genera containing potentially pathogenic species: DNA detection does not demonstrate viability, infectivity or a clinically relevant strain. A practical panel should therefore combine the following components: absolute bacterial abundance; abundance of human-associated taxa; an indoor/outdoor ratio or source metric; occupancy and CO₂; ventilation mode; particulate matter or particle-size data; and, in healthcare-related settings, selected resistance phenotypes or ARGs. Repeated measurements across seasons and periods of room use are necessary to distinguish a stable facility signature from short-term variability. The principal methodological limitation is that culture, qPCR and sequencing measure different fractions of the aerobiome; sampler type, air volume, medium, incubation and molecular target can therefore substantially affect the observed abundance and community profile. Consequently, bioindicator thresholds require method-specific, multicentre validation before routine use (Table 2).

Table 2. Proposed components of a bacterial bioindicator panel for public indoor environments

Component	Interpretation	Main limitation
Absolute bacterial abundance	Magnitude of microbial emission and/or resuspension	Strongly method- and time-dependent.
Human-associated taxa	Occupancy and direct human contribution	Low facility specificity when used alone.
Indoor/outdoor comparison	Relative importance of indoor and outdoor sources	Requires simultaneous outdoor sampling.
CO ₂ , occupancy and PM	Context for ventilation and resuspension	Indirect proxies; affected by building operation.
Resistance phenotypes/ ARGs	Functional signal of antimicrobial pressure, mainly in healthcare	Detection of ARGs does not demonstrate the presence of viable resistant bacterial hosts.

Source: authors' own compilation based on the literature reviewed.

4. Conclusions

Bacterial communities in the indoor air of public buildings differ according to facility type, occupancy, physical activity, ventilation and antimicrobial pressure. Polish studies provide supporting evidence from schools, sports facilities, hospitals, pharmacies and offices. The strongest bioindicator potential lies not in a single taxon but in a facility-specific panel combining bacterial abundance, source-related taxa, indoor/outdoor relationships, occupancy/CO₂, particulate matter and, where justified, antimicrobial resistance markers. Standardised and repeated monitoring is required before such panels can be implemented in routine indoor air assessment.

Bibliography:

1. Andraka A., Andraka M., Butarewicz A., Hawrylik E. (2025). Microbial air contamination inside academic buildings in Białystok University of Technology. *Advances in Science and Technology Research Journal*, 19(10), 412–421. DOI: 10.12913/22998624/208114.
2. Brągoszewska E., Mainka A., Pastuszka J.S. (2016a). Bacterial and Fungal Aerosols in Rural Nursery Schools in Southern Poland. *Atmosphere*, 7(11), 142. DOI: 10.3390/atmos7110142.
3. Brągoszewska E., Mainka A., Pastuszka J.S. (2016b). Bacterial aerosols in an urban nursery school in Gliwice, Poland: a case study. *Aerobiologia*, 32, 469–480. DOI: 10.1007/s10453-015-9419-x.
4. Brągoszewska E., Biedroń I., Kozielska B., Pastuszka J.S. (2018a). Microbiological indoor air quality in an office building in Gliwice, Poland: analysis of the case study. *Air Quality, Atmosphere & Health*, 11, 729–740. DOI: 10.1007/s11869-018-0579-z.
5. Brągoszewska E., Mainka A., Pastuszka J.S., Lizończyk K., Desta Y.G. (2018b). Assessment of Bacterial Aerosol in a Preschool, Primary School and High School in Poland. *Atmosphere*, 9(3), 87. DOI: 10.3390/atmos9030087.

6. Brągoszewska E., Biedroń I., Mainka A. (2020). Microbiological Air Quality in a Highschool Gym Located in an Urban Area of Southern Poland—Preliminary Research. *Atmosphere*, 11(8), 797. DOI: 10.3390/atmos11080797.
7. Chatthanathon P., Wongsawaeng D., Chetwittayachan T., Cheibchalard T., Leelahavanichkul A., Kowitdamrong E., Sayasathid J., Somboonna N. (2026). Air Bacterial Microbiomes in Hospitals: Case Studies from a Metropolis and a Small City of Thailand. *Computational and Structural Biotechnology Journal*, 35(1), 0068. DOI: 10.34133/csbj.0068.
8. Deng W., Chai Y., Lin H., So W.W.M., Ho K.W.K., Tsui A.K.Y., Wong R.K.S. (2016). Distribution of bacteria in inhalable particles and its implications for health risks in kindergarten children in Hong Kong. *Atmospheric Environment*, 128, 268–275. DOI: 10.1016/j.atmosenv.2016.01.017.
9. Dumala S.M., Dudzińska M.R. (2013). Microbiological Indoor Air Quality in Polish Schools. *Rocznik Ochrona Środowiska (Annual Set The Environment Protection)*, 15, 231–244.
10. Fernandes J.J.D., Aguiar P.A.D.F., Mendes-Rodrigues C., Martins C.H.G. (2023). Assessing bacterial bioaerosol and environmental variables of critical hospitalization units of a tertiary hospital. *Aerobiologia*, 39, 285–302. DOI: 10.1007/s10453-023-09792-9.
11. Gilbert Y., Veillette M., Duchaine C. (2010). Airborne bacteria and antibiotic resistance genes in hospital rooms. *Aerobiologia*, 26, 185–194. DOI: 10.1007/s10453-010-9155-1.
12. Hospodsky D., Qian J., Nazaroff W.W., Yamamoto N., Bibby K., Rismani-Yazdi H., Peccia J. (2012). Human Occupancy as a Source of Indoor Airborne Bacteria. *PLoS ONE*, 7(4), e34867. DOI: 10.1371/journal.pone.0034867.
13. Hospodsky D., Yamamoto N., Nazaroff W.W., Miller D., Gorthala S., Peccia J. (2015). Characterizing airborne fungal and bacterial concentrations and emission rates in six occupied children's classrooms. *Indoor Air*, 25(6), 641–652. DOI: 10.1111/ina.12172.
14. Huang H.L., Lee M.K., Shih H.W. (2017). Assessment of Indoor Bioaerosols in Public Spaces by Real-Time Measured Airborne Particles. *Aerosol and Air Quality Research*, 17, 2276–2288. DOI: 10.4209/aaqr.2017.02.0089.
15. Jankowiak E., Kubera Ł., Małecka-Adamowicz M., Dembowska E. (2020). Microbiological air quality in pharmacies and an antibiotic resistance profile of staphylococci species. *Aerobiologia*, 36, 551–563. DOI: 10.1007/s10453-020-09651-x.
16. Jo W.K., Seo Y.J. (2005). Indoor and outdoor bioaerosol levels at recreation facilities, elementary schools, and homes. *Chemosphere*, 61(11), 1570–1579. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2005.04.103.
17. Kembel S.W., Jones E., Kline J., Northcutt D., Stenson J., Womack A.M., Bohannon B.J.M., Brown G.Z., Green J.L. (2012). Architectural design influences the diversity and structure of the built environment microbiome. *The ISME Journal*, 6, 1469–1479. DOI: 10.1038/ismej.2011.211.
18. Khan B.A., Roy S., Tahsin N., Baidya K., Das K.C., Islam M.S., Ahsan N., Salam A. (2024). Antibiotic resistance of bioaerosols in particulate matter from indoor environments of the hospitals in Dhaka Bangladesh. *Scientific Reports*, 14, 29884. DOI: 10.1038/s41598-024-81376-0.

19. Kim K.Y., Kim Y.S., Kim D. (2010). Distribution Characteristics of Airborne Bacteria and Fungi in the General Hospitals of Korea. *Industrial Health*, 48(2), 236–243. DOI: 10.2486/indhealth.48.236.
20. Kim Y.J., Lee B.G., Shim J.E., Lee H., Park J.H., Yeo M.K. (2024). Airborne bacteria in institutional and commercial buildings in Korea: Characterization with 16S rRNA gene sequencing and association with environmental conditions. *Aerosol Science and Technology*, 58(11), 1281–1292. DOI: 10.1080/02786826.2024.2387135.
21. Kryger M., Maćkowska A., Kortus K., Koczura R., Mokracka J. (2026). Potentially Pathogenic Bacteria in Urban Indoor Air Assessed by Culture-Dependent and Culture-Independent Quantitative PCR Methods: A Study of Public Service Buildings in Poznań, Poland. *Indoor Air*, 2026(1), 9391397. DOI: 10.1155/ina/9391397.
22. Kubera Ł., Studzińska J., Dokładna W., Małecka-Adamowicz M., Donderski W. (2015). Microbiological air quality in some kindergartens and antibiotic resistance of bacteria of the *Staphylococcus* spp. genus. *Medycyna Pracy*, 66(1), 49–56. DOI: 10.13075/mp.5893.00162.
23. Lee B.G., Yang J.I.L., Kim E., Geum S.W., Park J.H., Yeo M.K. (2021). Investigation of bacterial and fungal communities in indoor and outdoor air of elementary school classrooms by 16S rRNA gene and ITS region sequencing. *Indoor Air*, 31(5), 1553–1562. DOI: 10.1111/ina.12825.
24. Lee H., Lee B.G., Kim Y.J., Shim J.E., Yeo M.K. (2024). Assessment of airborne bacteria in the indoor of public-use facilities concentrated on influencing factors and opportunistic pathogenic bacteria. *Air Quality, Atmosphere & Health*, 17, 1725–1738. DOI: 10.1007/s11869-024-01540-3.
25. Lin T.H., Chou Y.H., Hsu T.Y., Hung C.H., Lai C.Y. (2024). Association among polydisperse aerodynamic size of bioaerosols, biodiversity and urbanization in kindergartens. *Chemosphere*, 359, 142333. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2024.142333.
26. Liu Y., Wang Y., Hao C., Li Y., Lou H., Hong Q., Dong H., Zhu H., Lai B., Liu Y., Li J. (2025). Pathogenic bacteria and antibiotic resistance genes in hospital indoor bioaerosols: pollution characteristics, interrelation analysis, and inhalation risk assessment. *Environmental Pollution*, 374, 126243. DOI: 10.1016/j.envpol.2025.126243.
27. Małecka-Adamowicz M., Kubera Ł., Jankowiak E., Dembowska E. (2019). Microbial diversity of bioaerosol inside sports facilities and antibiotic resistance of isolated *Staphylococcus* spp. *Aerobiologia*, 35, 731–742. DOI: 10.1007/s10453-019-09613-y.
28. Małecka-Adamowicz M., Koim-Puchowska B., Dembowska E.A. (2020). Diversity of Bioaerosols in Selected Rooms of Two Schools and Antibiotic Resistance of Isolated *Staphylococcal* Strains (Bydgoszcz, Poland): A Case Study. *Atmosphere*, 11(10), 1105. DOI: 10.3390/atmos11101105.
29. Manazyle A.S.A., Raffy G., Le Cann P., Costarramone N., Plaisance H., Glorennec P., Desauziers V., Le Bot B. (2026). SVOCs, VOCs and microbiological contamination in sports facilities, what are people exposed to? *Science of the Total Environment*, 1015, 181408. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2026.181408.
30. Meadow J.F., Altrichter A.E., Kembel S.W., Kline J., Mhuireach G.Á., Moriyama M., Northcutt D., O'Connor T.K., Womack A.M., Brown G.Z., Green J.L., Bohannan B.J.M.

- (2014). Indoor airborne bacterial communities are influenced by ventilation, occupancy, and outdoor air source. *Indoor Air*, 24(1), 41–48. DOI: 10.1111/ina.12047.
31. Nazaroff W.W. (2016). Indoor bioaerosol dynamics. *Indoor Air*, 26(1), 61–78. DOI: 10.1111/ina.12174.
32. Pastuszka J.S., Paw U.K.T., Lis D.O., Wlazło A., Ulfig K. (2000). Bacterial and fungal aerosol in indoor environment in Upper Silesia, Poland. *Atmospheric Environment*, 34, 3833–3842. DOI: 10.1016/S1352-2310(99)00527-0.
33. Pastuszka J.S., Marchwińska-Wyrwał E., Wlazło A. (2005). Bacterial Aerosol in Silesian Hospitals: Preliminary Results. *Polish Journal of Environmental Studies*, 14(6), 883–890.
34. Pastuszka J.S., Mucha W., Wlazło A., Lis D., Marchwińska-Wyrwał E., Mainka A. (2019). The Study of the Sterilization of the Indoor Air in Hospital/Clinic Rooms by Using the Electron Wind Generator. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 16(24), 4935. DOI: 10.3390/ijerph16244935.
35. Prussin A.J. II, Vikram A., Bibby K.J., Marr L.C. (2016). Seasonal Dynamics of the Airborne Bacterial Community and Selected Viruses in a Children's Daycare Center. *PLoS ONE*, 11(3), e0151004. DOI: 10.1371/journal.pone.0151004.
36. Qian J., Hospodsky D., Yamamoto N., Nazaroff W.W., Peccia J. (2012). Size-resolved emission rates of airborne bacteria and fungi in an occupied classroom. *Indoor Air*, 22(4), 339–351. DOI: 10.1111/j.1600-0668.2012.00769.x.
37. Szulc J., Okrasa M., Ryngajło M., Pielech-Przybylska K., Gutarowska B. (2023). Markers of Chemical and Microbiological Contamination of the Air in the Sport Centers. *Molecules*, 28(8), 3560. DOI: 10.3390/molecules28083560.
38. Tamsi N.S.F., Latif M.T., Othman M., Abu Bakar F.D., Yusof H.M., Noraini N.M.R., Zahaba M., Sahani M. (2022). Antibiotic resistance of airborne bacterial populations in a hospital environment. *Environmental Monitoring and Assessment*, 194, 629. DOI: 10.1007/s10661-022-10291-6.
39. Wu D., Jin L., Xie J., Liu H., Zhao J., Ye D., Li X.-D. (2022). Inhalable antibiotic resistomes emitted from hospitals: metagenomic insights into bacterial hosts, clinical relevance, and environmental risks. *Microbiome*, 10, 19. DOI: 10.1186/s40168-021-01197-5.
40. Yang J.I.L., Lee B.G., Park J.H., Yeo M.K. (2022). Airborne fungal and bacterial microbiome in classrooms of elementary schools during the COVID-19 pandemic period: Effects of school disinfection and other environmental factors. *Indoor Air*, 32(9), e13107. DOI: 10.1111/ina.13107.

10. PROJEKTOWANIE AUTORSKICH MIESZANEK NASION NA MIODODAJNE ŁĄKI KWIETNE DLA PRZESTRZENI ZURBANIZOWANYCH NA PRZYKŁADZIE AGLOMERACJI LUBELSKIEJ W CELU WSPARCIA MIEJSKIEGO PSZCZELARSTWA

Justyna Wielgos

Uniwersytet Przyrodniczy w Lublinie

Wydział Agrobioinżynierii

Katedra Łąkarstwa i Kształtowania Krajobrazu

E-mail: justyna.wielgos@up.edu.pl

Abstrakt: Niniejsze opracowanie stanowi rygorystyczną analizę możliwości optymalizacji miejskiej bazy pożytkowej dla owadów zapylających poprzez projektowanie specjalistycznych zbiorowisk roślinnych typu „łąka kwietna”, dostosowanych do specyficznych uwarunkowań fizjograficznych Lublina. Głównym celem badawczym była dekonstrukcja nieefektywnego modelu tradycyjnych trawników gazonowych na rzecz rozwiązań typu *Nature-Based Solutions*, które skutecznie mitygują negatywne skutki Miejskiej Wyspy Ciepła (MWC) oraz przeciwdziałają drastycznemu wzrostowi ewapotranspiracji w okresach letnich susz. Metodologia pracy opiera się na wielokryterialnej waloryzacji terenów wdrożeniowych aglomeracji lubelskiej, obejmującej analizę unikalnego systemu suchych wąwozów lessowych oraz dolin rzecznych, a także na precyzyjnym doborze taksonomicznym z wykorzystaniem rekalkulowanych wskaźników ekologicznych Zarzyckiego. W procesie projektowania uwzględniono kluczowe wskaźniki edaficzne, takie jak postępująca alkalizacja podłoża ($\text{pH} > 7,5$) w pasach drogowych oraz wysoka podatność gleb lessowych na erozję wodną podczas letnich deszczy nawalnych. Szczególny nacisk położono na architekturę systemów korzeniowych wybranych gatunków – wprowadzenie roślin o palowym systemie korzeniowym (sięgającym poniżej 150 cm) pozwala na efektywne pobieranie wody z głębszych warstw profilu glebowego oraz mechaniczną stabilizację skarp. Wynikiem badań jest opracowanie trzech autorskich receptur nasiennych: „Kserotermiczny Wąwóz Lubelski”, „Dolina Rzeczna – Bystrzyca” oraz „Bezpieczny Pas Drogowy”. Każda z nich została zaprojektowana tak, aby wypełnić lukę pożytkową w krytycznym okresie lipca i sierpnia, wspierając tym samym sieć pasiek miejskich (CSK, KUL, VIVO!). Analiza ekonomiczna oparta na danych Zarządu Dróg i Transportu Miejskiego (ZDiTM) wykazała, że implementacja projektowanych zbiorowisk pozwala na redukcję kosztów utrzymania zieleni o 77% w stosunku do trawników dywanowych, co generuje zysk operacyjny dla budżetu miasta na poziomie 23 000 PLN/ha rocznie.

1. Wstęp i kontekst ekologiczny Lublina

Współczesne zarządzanie infrastrukturą błękitno-zieloną w miastach wymaga radykalnego odejścia od energochłonnych trawników dywanowych na rzecz bioróżnorodnych łąk kwietnych (Zych i in., 2020). Tradycyjne formy utrzymania zieleni, oparte na monokulturach traw, generują wysoki ślad węglowy i tworzą w strukturze urbanistycznej tzw. „pustynie pokarmowe”, drastycznie ograniczając bazę pożytkową dla entomofauny (Janecki, 1999; Kaczyńska, 2018).

Lublin jest aglomeracją o unikalnym profilu geomorfologicznym, zdominowanym przez system suchych wąwozów lessowych oraz doliny rzeczne Bystrzycy, Czechówki i Czerniejówki (Maruszczak, 2001; Stochlak, 2000). To specyficzne ukształtowanie terenu sprzyja formowaniu się silnej Miejskiej Wyspy Ciepła (MWC), której negatywne skutki dla roślinności są szczególnie odczuwalne podczas coraz częstszych deficytów opadowych (Wereski i Krzyżewska, 2011). W obliczu prężnie rozwijającego się w Lublinie pszczelarstwa miejskiego, konieczne jest wdrażanie rozwiązań zapewniających ciągłość taśmy pokarmowej dla pszczół w całym sezonie wegetacyjnym (Lipiński, 2010).

2. Analiza warunków siedliskowych aglomeracji lubelskiej

2.1. Klimat i Miejska Wyspa Ciepła

Lublin charakteryzuje się klimatem umiarkowanym przejściowym z wyraźnymi cechami kontynentalizmu. Średnia roczna suma opadów (550–600 mm) jest rozłożona niekorzystnie (Kaszewski, 2008). Dominującą, lecz niepożądaną formą są letnie deszcze nawalne, które zamiast infiltrować podłoże, powodują gwałtowny spływ powierzchniowy i erozję lessu. Zjawisko MWC generuje różnice temperatur rzędu 5–8°C między centrum a peryferiami, co drastycznie podnosi ewapotranspirację i eliminuje gatunki o płytkim systemie korzeniowym (Maruszczak, 2001; Wysocki i Sikorski, 2014).

2.2. Uwarunkowania glebowe

Gleby Lublina, choć genetycznie wywodzące się z żyznych lessów, mają status gleb antropogenicznych. W pasach drogowych kluczowymi problemami są alkalizacja podłoża, $\text{pH} > 7,5$ oraz zasolenie NaCl , wynik zimowego utrzymania dróg. Dodatkowo gleby te cechują się wysoką kompaktacją i tendencją do tworzenia warunków beztlenowych w okresach podtopień w dolinach rzecznych (Maruszczak, 2001).

3. Charakterystyka stanowisk badawczych

Do opracowania mieszanek wytypowano trzy reprezentatywne i problematyczne lokalizacje w przestrzeni Lublina, co zestawiono w Tabeli 1 i 2.

Tabela 1. Opis wybranych stanowisk

Stanowisko	Typ siedliska	Wyzwania projektowe
A – Skarpa Wąwozu Rury	Ekstremalnie suche, kserotermiczne, podłoże lessowe.	Stabilizacja zboczy przed erozją, wprowadzenie gatunków o palowym systemie korzeniowym (>150 cm).
B – Dolina rzeki Bystrzycy	Terasa zalewowa, mady rzeczne, wysoki poziom wód gruntowych.	Odporność na okresowe podtopienia i stres wodny, beztlenowe warunki w strefie korzeniowej.
C – Pasy zieleni przy Al. Solidarności	Gleba antropogeniczna, MWC, silne zasolenie komunikacyjne.	Tolerancja na stres solny (halofity), odporność na przegrzewanie, bezpieczeństwo ruchu, rośliny niskie.

Źródło: opracowanie własne.

Tabela 2. Macierz oceny warunków siedliskowych

Lokalizacja	Poziom nasłonecznienia	Wilgotność gleby	Poziom zasolenia
A – Skarpa Wąwozu Rury	Bardzo wysokie	Niska	Niskie
B – Dolina rzeki Bystrzycy	Średnie	Bardzo wysoka	Niskie
C – Pasy zieleni przy Al. Solidarności	Bardzo wysokie	Bardzo niska	Bardzo wysokie

Źródło: opracowanie własne.

4. Metodologia doboru gatunków według wskaźników Zarzyckiego

W procesie doboru gatunkowego na podstawie analizy literatury (Falkowski, 1982), wykorzystano liczby ekologiczne (Tabela 3) (Zarzycki i in., 2002), stosując skalę dostosowaną do ekstremalnych warunków miejskich Lublina.

Tabela 3. Wartości wskaźników ekologicznych oraz wydajność miodowa wybranych taksonów

Gatunek rośliny	Światło (L) [1–5]	Wilgotność (W) [1–6]	Odczyn pH (R)	Azot (N)	Wydajność miodowa [kg/ha]	Przeznaczenie
Żmijowiec zwyczajny	5	2	4	3	ok. 400	Mieszanka 1
Nostrzyk biały	5	3	4	2	ok. 600	Mieszanka 1
Szałwia łąkowa	5	3	5	3	ok. 250	Mieszanka 1
Chaber bławatek	5	3	4	3	ok. 300	Mieszanka 1
Komonica zwyczajna	4	4	4	2	ok. 100	Mieszanka 1
Kostrzewa owcza	4	3	2	2	Brak	Mieszanka 1
Krwawnica pospolita	4	6	4	4	ok. 200	Mieszanka 2
Wiązówka błotna	4	6	4	4	Brak (pyłkodajna)	Mieszanka 2
Żywokost lekarski	3	5	4	5	ok. 150	Mieszanka 2
Koniczyna białoróżowa	4	4	4	4	ok. 100	Mieszanka 2
Złocień właściwy	4	4	4	3	ok. 40	Mieszanka 2
Wiechlina łąkowa	4	4	4	4	Brak	Mieszanka 2
Koniczyna biała	5	3	4	3	ok. 100	Mieszanka 3
Krwawnik	5	2	3	3	ok. 50	Mieszanka 3

pospolity						
Życica trwała	5	3	4	5	Brak	Mieszanka 3
Stokrotka pospolita	5	3	4	4	ok. 30	Mieszanka 3
Przetacznik ożankowy	4	3	3	3	ok. 20	Mieszanka 3

Źródło: opracowanie własne.

5. Autorskie receptury mieszanek nasiennych

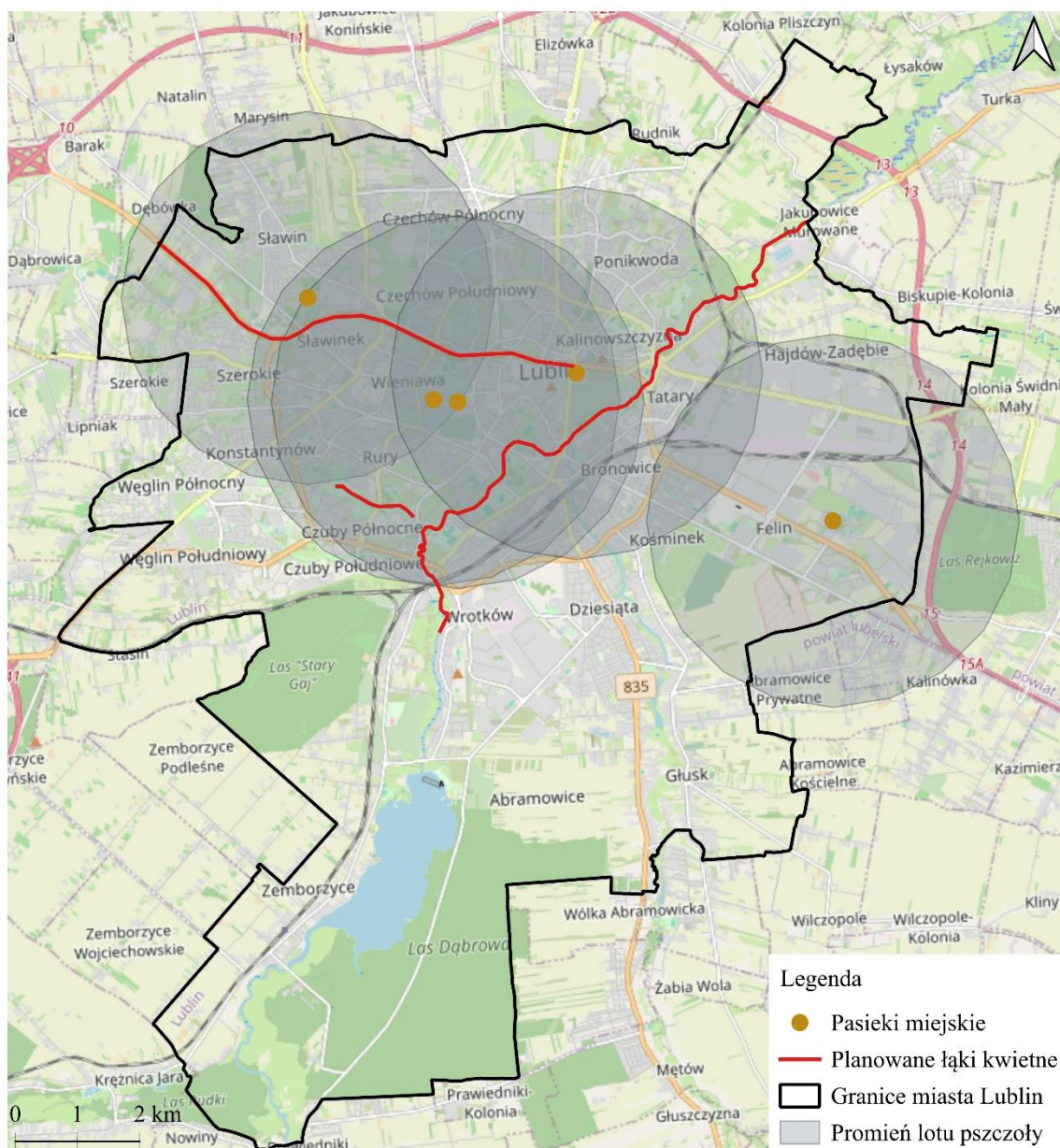
Zastosowano normę wysiewu na poziomie 2,0–3,0 g/m² (20–30 kg/ha), co ogranicza konkurencję i promuje bioróżnorodność (Janecki, 1999; Grzegorzczak, 2010).

- **Mieszanka Nr 1: "Kserotermiczny Wąwóz Lubelski"** (lokalizacja A – Skarpa Wąwozu Rury). Skład: Kostrzewa owcza (30%), Żmijowiec zwyczajny (20%), Nostrzyk biały (15%), Komonica zwyczajna (15%), Chaber bławatek (10%), Szałwia łąkowa (10%). Mieszanka stabilizuje skarpy lessowe i jest wybitnie odporna na suszę (Falkowski, 1982).
- **Mieszanka Nr 2: "Dolina Rieczna – Bystrzyca"** (lokalizacja B – Dolina rzeki Bystrzycy). Skład: Wiechlina łąkowa (20%), Krwawnica pospolita (20%), Koniczyna białoróżowa (20%), Żywokost lekarski (15%), Złocień właściwy (15%), Wiązówka błotna (10%). Gatunki te tolerują okresowe zalewanie i wysoki poziom wód (Falkowski, 1982).
- **Mieszanka Nr 3: "Bezpieczny Pas Drogowy"** (lokalizacja C – Pasy zieleni przy Al. Solidarności). Skład: Koniczyna biała (35%), Stokrotka pospolita (20%), Życica trwała (20%), Krwawnik pospolity (15%), Przetacznik ożankowy (10%). Rośliny niskorosnące, mrozoodporne i tolerujące wysokie zasolenie (halofity fakultatywne) (Falkowski, 1982).

6. Pszczelarstwo miejskie i luka pożytkowa

Lublin jest obecnie jednym z krajowych liderów rozwoju pszczelarstwa miejskiego, gdzie zjawisko to ewoluowało z niszowego trendu ekologicznego w istotny element lokalnej biogospodarki. Kluczowe pasieki miejskie zlokalizowane są w strategicznych punktach aglomeracji: na dachu Centrum Spotkania Kultur (CSK), Katolickiego Uniwersytetu Lubelskiego (KUL), w Centrum Handlowym VIVO!, Uniwersytecie Przyrodniczym w Lublinie oraz na terenie Ogrodu Botanicznego UMCS (Ryc. 1). Utrzymanie rentowności i stabilności tych pasiek wymaga zapewnienia owadom ciągłego dostępu do pożytku, czyli nektaru i pyłku, przez cały sezon wegetacyjny (Lipiński, 2010). Głównym problemem ekosystemowym Lublina jest tzw. luka pożytkowa, występująca najdotkliwiej na przełomie lipca i sierpnia. W tym okresie tradycyjne trawniki dywanowe, ze względu na częste koszenie i niską różnorodność florystyczną, stają się „pustyniami pokarmowymi” (Janecki, 1999; Kaczyńska, 2018). Zgodnie z literaturą przedmiotu, taki model zarządzania zielenią wykazuje ujemny bilans ekologiczny i nie zaspokaja elementarnych potrzeb apifauny (Janecki, 1999). Projektowane autorskie mieszanki nasienne stanowią bezpośrednią odpowiedź na te deficyty. Uwzględniając, że efektywny promień lotu pszczoły miodnej wynosi średnio do 3 km

(Lipiński 2010), lokalizacja łąk w Wąwozie Rury, Dolinie Bystrzycy oraz wzdłuż Al. Solidarności tworzy kluczowy korytarz ekologiczny wspierający miejskie zapylacze.



Rycina 1. Mapa Lublina z zaznaczonymi głównymi pasiekami miejskimi oraz ich efektywnym promieniem lotu pożytkowego (około 3 km), nakładającym się na proponowane lokalizacje łąk kwietnych

Źródło: opracowanie własne.

Innowacyjność projektu polega na doborze gatunków o wysokiej wydajności miodowej i specyficznych strategiach adaptacyjnych:

- Mieszanka nr 2 oparta na roślinach znoszących stres wodny, takich jak krwawnica pospolita czy żywokost lekarski, stanowi naturalne zaplecze pożytkowe dla pasieki na dachu VIVO! Lublin.
- Mieszanki nr 1 i nr 3 wspierają pasieki zlokalizowane w ścisłym centrum miasta, m.in. CSK, KUL oraz Ogród Botaniczny UMCS.

Wprowadzenie do aglomeracji gatunków takich jak żmijowiec zwyczajny (*Echium vulgare*) o wydajności ok. 400 kg/ha oraz nostryk biały (*Melilotus albus*) o wydajności ok. 600 kg/ha, pozwala skutecznie wypełnić lukę pożytkową nawet w warunkach ekstremalnej suszy i Miejskiej Wyspy Ciepła (Lipiński, 2010; Kołtowski, 2006). Dzięki głębokiemu, palowemu systemowi korzeniowemu rośliny te są w stanie pobierać wodę z głębszych warstw profilu glebowego, co gwarantuje stabilną produkcję nektaru w okresach bezdeszczowych (Zarzycki i in., 2002). Takie podejście wpisuje się bezpośrednio w założenia Narodowej Strategii Ochrony Owadów Zapyłających (Zych i in., 2020) oraz realizuje cele Strategii Rozwoju Lublina 2030 w zakresie wzmacniania usług ekosystemowych i ochrony lokalnej bioróżnorodności.

7. Analiza ekonomiczna i model usług ekosystemowych

Kluczowym argumentem przemawiającym za transformacją miejskich terenów zieleni jest optymalizacja kosztów operacyjnych ponoszonych przez budżet samorządowy. Tradycyjny model utrzymania zieleni, oparty na intensywnie pielęgnowanych trawnikach gazonowych, generuje wysokie nakłady finansowe przy relatywnie niskiej wartości ekosystemowej. W niniejszej analizie zestawiono koszty utrzymania 1 ha (10 000 m²) zieleni w skali jednego sezonu wegetacyjnego, przyjmując za bazę obliczeniową stawkę jednostkową 0,50 PLN/m² za jednokrotny zabieg koszenia. Stawka ta została wyznaczona na podstawie analizy publicznych ofert przetargowych oraz procesów inwestycyjnych Zarządu Dróg i Transportu Miejskiego (ZDiTM) w Lublinie.

7.1. Koszt utrzymania trawnika konwencjonalnego (C_t)

Utrzymanie trawnika w standardzie miejskim wymaga zachowania niskiej darni, co wiąże się z wysoką częstotliwością zabiegów agrotechnicznych. Zgodnie z literaturą przedmiotu oraz standardami pielęgnacyjnymi, przyjmuje się liczbę $n = 6$ koszeń w sezonie (Janecki, 1999).

- Algorytm kosztowy: $C_t = 10\,000\text{ m}^2 \times 0,50\text{ PLN/m}^2 \times 6\text{ zabiegów} = 30\,000\text{ PLN/Rok}$
- Kwota ta obejmuje koszty pracy (L), paliwa (F) oraz amortyzacji sprzętu (E). W warunkach silnej Miejskiej Wyspy Ciepła w Lublinie, realny koszt może być wyższy o nakłady na nawadnianie (W), niezbędne do uniknięcia całkowitej degradacji darni.

7.2. Koszt utrzymania miododajnej łąki kwietnej (C_m)

Model łąkowy zakłada drastyczną redukcję interwencji mechanicznych. Po etapie założenia zbiorowiska, pielęgnacja ogranicza się do jednego koszenia interwencyjnego $n = 1$ koszenie, wykonywanego w terminie późnoletnim lub jesiennym.

- Algorytm kosztowy: $C_m = (10\,000\text{ m}^2 \times 0,50\text{ PLN/m}^2 \times 1\text{ zabieg}) + B = 7\,000\text{ PLN/Rok}$
- W kalkulacji uwzględniono parametr B, oznaczający koszt zbioru i wywozu biomasy, który jest niezbędny dla zachowania różnorodności florystycznej i estetyki miejskiej (Grzegorzczak, 2010).

7.3. Porównanie i interpretacja wyników

Zestawienie obu modeli (Tabela 4) wykazuje, że wprowadzenie autorskich mieszanek nasion pozwala na uzyskanie bezpośrednich oszczędności budżetowych.

Tabela 4. Porównanie rocznych kosztów operacyjnych utrzymania 1 ha zieleni miejskiej w aglomeracji lubelskiej

Parametr kalkulacyjny	Trawnik konwencjonalny (C_t)	Miododajna łąka kwietna (C_m)
Powierzchnia bazowa	10 000 m ² (1 ha)	10 000 m ² (1 ha)
Częstotliwość zabiegów (n)	6 koszeń w sezonie	1 koszenie interwencyjne
Stawka jednostkowa (ZDiTM)	0,50 PLN / m ²	0,50 PLN / m ²
Koszty dodatkowe	Nawadnianie (W) w okresie suszy	Zbiór i wywóz biomasy (B)
Suma kosztów (rocznie/ha)	30 000 PLN	7 000 PLN
Bilans ekonomiczny	—	23 000 PLN zysku (oszczędność 77%)

Źródło: opracowanie własne.

8. Wnioski i rekomendacje wdrożeniowe

Specyfika Lublina (geologia lessowa, doliny rzeczne, MWC) wymusza odejście od uniwersalnych mieszanek nasion na rzecz kompozycji profilowanych siedliskowo. Zastosowanie systemów korzeniowych o typie palowym w mieszance "Wąwóz" zapewnia mechaniczną ochronę skarp przed erozją wywołaną przez deszcze nawalne. Dodatkowo, łąki kwietne stanowią narzędzie optymalizacji budżetowej, redukując koszty utrzymania zieleni o 77%. Rekomenduje się włączenie opracowanych receptur do Specyfikacji Istotnych Warunków Zamówienia (SIWZ) przez ZDiTM. Projekt jest w pełni spójny z celami dokumentu Strategia Rozwoju Lublina 2030 w zakresie adaptacji do zmian klimatu.

Bibliografia:

1. Falkowski M. (red.), *Trawy polskie*, Państwowe Wydawnictwo Rolnicze i Leśne (PWRiL), Warszawa 1982.
2. Grzegorzczak S. (red.), *Łąkarstwo*, Wydawnictwo Uniwersytetu Warmińsko-Mazurskiego, Olsztyn 2010.
3. Janecki J., *Łąki kwietne. Zasady zakładania i pielęgnacji*, Wydawnictwo SGGW, Warszawa 1999.
4. Kaczyńska M., *Zieleń w przestrzeni miejskiej – od estetyki do ekosystemu*, Wydawnictwo SGGW, Warszawa 2018.
5. Kaszewski B.M., *Warunki klimatyczne Lublina*, Lublin: UMCS, 2008.
6. Kołtowski Z., *Wielki atlas roślin miododajnych*, Wydawnictwo Pasieka, 2006.
7. Lipiński M., *Pożytki pszczele: zapylanie i miododajność roślin*, Powszechnie Wydawnictwo Rolnicze i Leśne (PWRiL), Warszawa 2010.
8. Maruszczak H., *Środowisko przyrodnicze Lublina*, Lubelskie Towarzystwo Naukowe (LTN), Lublin 2001.

9. Stochlak J., *Wąwozy i suche doliny Lublina. Potencjał i zagrożenia*, Wydawnictwo KUL, Lublin 2000.
10. Strategia Rozwoju Lublina 2030, https://lublin.eu/gfx/lublin/userfiles/_public/biznes/2030/strategia_lublin_2030_-_wersja_dostepna.pdf, dostęp 12.12.2025 r.
11. Wereski S., Krzyżewska A., *Miejska wyspa ciepła w Lublinie*, 2011.
12. Wysocki C., Sikorski P., *Fitosocjologia stosowana w ochronie i kształtowaniu krajobrazu*, Wydawnictwo SGGW, Warszawa 2014.
13. Zarzycki K., Trzcińska-Tacik H., Różański W., Szelaż Z., Wołek J., Korzeniak U., *Wskaźniki ekologiczne roślin naczyniowych Polski*, Instytut Botaniki im. W. Szafera PAN, Kraków 2002.
14. Zych M., Denisow B., Gajda A., Kiljanek T., Kramarz P., Szentgyörgyi H., *Narodowa Strategia Ochrony Owadów Zapylających*, Warszawa 2020.

III NAUKI MEDYCZNE

1. CHARAKTERYSTYKA GENOMOWA SZCZEPU *PANTOEA AGGLOMERANS* 113 JAKO PODSTAWA OCENY JEGO POTENCJAŁU BIOTECHNOLOGICZNEGO

Emilia Szczepańska

Uniwersytet Jana Kochanowskiego w Kielcach

Wydział Nauk Ścisłych i Przyrodniczych

Studenckie Koło Naukowe Mikroby

ul. Uniwersytecka 7, 25-406 Kielce

E-mail: emilia.szczepanska24@gmail.com

1. Wstęp

Współczesna biotechnologia rolnicza i środowiskowa coraz częściej wykorzystuje mikroorganizmy naturalnie związane z roślinami jako potencjalną alternatywę lub uzupełnienie tradycyjnych metod nawożenia, ochrony roślin oraz ograniczania skutków zanieczyszczenia środowiska. Szczególne znaczenie przypisuje się bakteriom promującym wzrost roślin (PGPB, *plant growth-promoting bacteria*), które mogą oddziaływać na gospodarza poprzez zwiększanie dostępności składników mineralnych, produkcję fitohormonów, ograniczanie skutków stresu biotycznego i abiotycznego oraz konkurencję z mikroorganizmami fitopatogennymi [Glick, 2012; de Souza i in., 2015; Bianco, 2024]. Do mikroorganizmów zwracających uwagę ze względu na znaczną różnorodność funkcjonalną należy rodzaj *Pantoea*. Jego przedstawiciele zasiedlają liczne nisze ekologiczne i byli izolowani m.in. z gleby, wody, powierzchni i tkanek roślin oraz ze środowisk związanych z owadami, zwierzętami i człowiekiem [Walterson i Stavrínides, 2015; Rezzonico i in., 2009; Bonaterra i in., 2014]. Jednym z najlepiej poznanych przedstawicieli tego rodzaju jest *Pantoea agglomerans* – Gram-ujemna bakteria, dawniej opisywana m.in. jako *Enterobacter agglomerans* oraz *Erwinia herbicola* [Rezzonico i in., 2009; Walterson i Stavrínides, 2015; Dutkiewicz i in., 2016]. Charakterystyczną cechą *P. agglomerans* jest znaczna różnorodność ekologiczna i funkcjonalna występująca na poziomie poszczególnych szczepów. Bakteria może funkcjonować jako mikroorganizm związany z roślinami, wykazywać właściwości promujące ich wzrost, uczestniczyć w biologicznej kontroli fitopatogenów, a jednocześnie część izolatów była identyfikowana w materiale klinicznym [Rezzonico i in., 2009; Walterson i Stavrínides, 2015; Rezzonico i in., 2012]. Z tego względu potencjał aplikacyjny *P. agglomerans* powinien być oceniany na poziomie konkretnego szczepu, z uwzględnieniem zarówno jego cech użytkowych, jak i zagadnień związanych z bezpieczeństwem biologicznym [Rezzonico i in., 2009; Bonaterra i in., 2014]. Podstawowe właściwości fenotypowe przedstawicieli *P. agglomerans* obejmują znaczną plastyczność metaboliczną, umożliwiającą funkcjonowanie w zróżnicowanych warunkach środowiskowych [Walterson

i Stavrinides, 2015]. Istotne znaczenie ekologiczne mogą mieć również ruchliwość komórek, adhezja oraz zdolność do tworzenia biofilmu. Cechy te sprzyjają przemieszczaniu się bakterii, przyleganiu do powierzchni i utrzymywaniu populacji w zajmowanej niszy, jednak ich znaczenie może różnić się między poszczególnymi izolatami. Jednym z najważniejszych kierunków badań dotyczących *P. agglomerans* jest jej potencjał jako bakterii promującej wzrost roślin. Mechanizmy korzystnego oddziaływania PGPB mogą obejmować m.in. produkcję fitohormonów, zwiększanie dostępności fosforu oraz pozyskiwanie żelaza za pośrednictwem sideroforów [Glick, 2012; Bianco, 2024]. W przypadku różnych szczepów *P. agglomerans* opisano obecność cech i determinant związanych z produkcją kwasu indolilo-3-octowego (IAA), solubilizacją fosforanów, gospodarką żelazem oraz innymi mechanizmami potencjalnie istotnymi w interakcjach bakteria-roślina [Shariati i in., 2017; Luziatelli i in., 2020a; Kumar i in., 2022]. Szczegółowa analiza szczepu C1 wykazała zarówno jego zdolność do produkcji IAA, jak i obecność genów związanych z mechanizmami promowania wzrostu roślin oraz tolerancją na niekorzystne warunki środowiskowe [Luziatelli i in., 2020a]. W badaniach dotyczących szczepu P5 zidentyfikowano liczne determinanty potencjalnie związane z właściwościami PGP, w tym gospodarką fosforanową oraz sideroforami [Shariati i in., 2017]. Podobny potencjał genomowy opisano również dla endofitycznego szczepu CPHN2 [Kumar i in., 2022]. Siderofory stanowią szczególnie interesującą grupę metabolitów w interakcjach mikroorganizmów ze środowiskiem. Związki te charakteryzują się wysokim powinowactwem do żelaza i umożliwiają bakteriom jego efektywne pozyskiwanie w warunkach ograniczonej dostępności. W środowisku roślinnym mechanizm ten może wspierać funkcjonowanie bakterii, a jednocześnie wpływać na konkurencję z innymi mikroorganizmami poprzez ograniczanie dostępności żelaza [Glick, 2012; Luziatelli i in., 2020a; Bianco, 2024]. Znaczenie biologiczne sideroforów jest jednak złożone i zależne zarówno od szczepu, jak i warunków środowiskowych. Drugim istotnym obszarem wykorzystania *P. agglomerans* jest biologiczna ochrona roślin. Szczególnie dobrze udokumentowano aktywność wybranych szczepów wobec *Erwinia amylovora*, czynnika etiologicznego zarazy ogniowej jabłoni i gruszy [Stockwell i in., 2002; Walterson i Stavrinides, 2015]. Mechanizm działania szczepów biokontrolnych nie sprowadza się do pojedynczej właściwości, lecz może obejmować konkurencję o niszę i składniki pokarmowe, efektywną kolonizację powierzchni roślinnych oraz produkcję metabolitów przeciwdrobnoustrojowych [Stockwell i in., 2002; Dagher i in., 2021; Kirk i in., 2024]. Badania terenowe Stockwell i wsp. [2002] wykazały, że szczep Eh252 ograniczał częstość występowania zarazy ogniowej średnio o $55 \pm 8\%$, podczas gdy mutant defektywny w produkcji antybiotyku powodował redukcję na poziomie $30 \pm 6\%$. Wyniki te wskazują, że antybioza stanowi istotny element biokontroli, ale nie jest jedynym mechanizmem odpowiedzialnym za ograniczenie rozwoju patogenu. Znaczenie interakcji między mikroorganizmami dodatkowo potwierdzono w badaniu, w którym zewnątrzkomórkowa proteaza *Pseudomonas fluorescens* A506 inaktywowała antybiotyki wytwarzane przez szczepy *P. agglomerans* Eh252 i C9-1 [Anderson i in., 2004]. Rodzaj *Pantoea* zwraca uwagę również ze względu na różnorodność wytwarzanych naturalnych produktów przeciwdrobnoustrojowych. Badania genomowe oraz funkcjonalne wskazują, że biosyntetyczne klastry genowe odpowiedzialne za syntezę tego typu związków mogą być rozmieszczone w sposób szczepozależny [Walterson i in., 2014; Kirk i in., 2024]. Podkreśla

to znaczenie analizy konkretnego izolatu, zamiast przypisywania całemu gatunkowi właściwości obserwowanych jedynie u wybranych szczepów. W literaturze opisywany jest również potencjał środowiskowy *P. agglomerans*. U części szczepów stwierdzono mechanizmy umożliwiające funkcjonowanie w środowiskach obciążonych metalami ciężkimi. W przypadku szczepu C1 wykazano tolerancję na arsenian oraz obecność determinant genomowych związanych z odpowiedzią na metale [Luziatelli i in., 2020a]. Badania Mohite i wsp. [2018] wskazały natomiast, że stres wywołany obecnością metali ciężkich może wpływać na produkcję egzopolisacharydów przez *P. agglomerans*. Właściwości takie uzasadniają dalsze badania nad wykorzystaniem wybranych izolatów w bioremediacji i wspomaganiu roślin funkcjonujących w środowiskach zdegradowanych. Rozwój technik sekwencjonowania całogenomowego znacząco rozszerzył możliwości charakterystyki bakterii o potencjalnym znaczeniu aplikacyjnym. Analizy genomowe pozwalają na dokładniejszą identyfikację izolatów, porównywanie szczepów, a także wykrywanie regionów związanych z biosyntezą metabolitów wtórnych i innymi właściwościami ważnymi ekologicznie [Smits i in., 2015; Dahiya i in., 2024; Kirk i in., 2024]. Szczególną grupę stanowią biosyntetyczne klastry genowe (BGC, *biosynthetic gene clusters*), których analiza umożliwia wstępne określenie potencjału mikroorganizmu do syntezy wybranych grup metabolitów. Jednym z wykorzystywanych do tego celu narzędzi jest platforma antiSMASH, umożliwiająca predykcję i klasyfikację regionów genomowych potencjalnie związanych z biosyntezą metabolitów wtórnych [Blin i in., 2023]. W przypadku rodzaju *Pantoea* analiza takich regionów jest szczególnie interesująca ze względu na znaczną różnorodność metabolitów przeciwdrobnoustrojowych oraz zmienne rozmieszczenie odpowiadających im klastrów [Walterson i in., 2014; Kirk i in., 2024]. Jednocześnie możliwość praktycznego wykorzystania szczepów *P. agglomerans* wymaga ostrożnej oceny. Badania porównawcze nie wykazały jednoznacznego rozdziału pomiędzy izolatami pochodzenia roślinnego i klinicznego, a część historycznych izolatów określanych jako *P. agglomerans* była błędnie identyfikowana [Rezzonico i in., 2009; Rezzonico i in., 2012]. Z tego względu pochodzenie szczepu nie powinno być jedyną podstawą oceny bezpieczeństwa, a charakterystyka potencjalnego izolatu użytkowego powinna łączyć wyniki badań fenotypowych i molekularnych z analizą genomową [Bonaterra i in., 2014].

Celem pracy było przedstawienie aktualnego stanu wiedzy dotyczącego właściwości biologicznych i możliwości aplikacyjnego wykorzystania *Pantoea agglomerans*, ze szczególnym uwzględnieniem zastosowań rolniczych i środowiskowych. Uzupełnieniem analizy literaturowej była podstawowa charakterystyka fenotypowa i biochemiczna szczepu *P. agglomerans* 113 wyizolowanego z korzeni *Orobancha picridis* oraz wstępna analiza jego potencjału biosyntetycznego z wykorzystaniem programu antiSMASH.

2. Materiały i Metody

Praca miała charakter przeglądowo-eksperymentalny. Część teoretyczną opracowano na podstawie publikacji naukowych dotyczących biologii *Pantoea agglomerans*, właściwości bakterii promujących wzrost roślin, mechanizmów biokontroli, tolerancji na czynniki stresowe, różnorodności szczepowej oraz możliwości wykorzystania metod genomowych w charakterystyce bakterii.

Materiał do części eksperymentalnej stanowił szczep *Pantoea agglomerans* 113 wyizolowany z korzeni *Orobancha picridis*. Materiałem wyjściowym była 24-godzinna hodowla bakteryjna prowadzona na podłożu LB. W celu podstawowej charakterystyki morfologicznej wykonano barwienie metodą Grama. Utrwalony preparat barwiono fioletem krystalicznym, następnie traktowano płynem Lugola, odbarwiano alkoholem i barwiono kontrastowo fuksyną. Preparaty analizowano mikroskopowo. Charakterystykę biochemiczną uzupełniono oceną zdolności badanego szczepu do wykorzystania wybranych substratów węglowych. Analiza miała na celu określenie podstawowego zakresu elastyczności metabolicznej izolatu oraz odniesienie uzyskanego profilu do właściwości opisywanych dla innych szczepów *P. agglomerans*. Oceniono również zdolność bakterii do różnych form ruchliwości. Ruchliwość typu swimming badano na podłożu LB zawierającym 0,3% agaru, natomiast swarming na podłożach zawierających 0,5% i 0,7% agaru. Inkubację prowadzono przez 24 godziny w temperaturze 28°C. Ruchliwość typu twitching oceniano na podłożu zawierającym 0,7% agaru, a strefę migracji komórek uwidaczniano poprzez barwienie fioletem krystalicznym. Zdolność do tworzenia biofilmu oceniono po hodowli bakterii w podłożu LB. Po początkowej 24-godzinnej hodowli zawiesinę bakteryjną przenoszono do probówek typu Falcon i inkubowano przez kolejne 48 godzin. Po usunięciu komórek planktonicznych powstałe struktury poddawano barwieniu fluorescencyjnemu oraz obserwacji mikroskopowej.

W ramach charakterystyki molekularnej wykonano sekwencjonowanie całogenomowe szczepu 113, a otrzymane dane wykorzystano do analiz bioinformatycznych. Na potrzeby niniejszego opracowania uwzględniono wyłącznie analizę potencjału biosyntezy metabolitów wtórnych. W tym celu zastosowano program antiSMASH, służący do identyfikacji i klasyfikacji biosyntetycznych klastrów genowych w genomach mikroorganizmów [Blin i in., 2023].

3. Wyniki

3.1. Znaczenie biologiczne i aplikacyjne *Pantoea agglomerans* - analiza danych literaturowych

Analiza danych literaturowych wskazuje, że *P. agglomerans* należy do bakterii o znacznej plastyczności ekologicznej i funkcjonalnej. Występowanie szczepów związanych z różnymi środowiskami znajduje odzwierciedlenie w zmienności ich właściwości metabolicznych i genomowych [Walterson i Stavrínides, 2015; Rezzonico i in., 2009; Dahiya i in., 2024]. Z perspektywy biotechnologii szczególnie interesujące są szczepy związane z roślinami, ponieważ u części z nich opisano równocześnie właściwości promujące wzrost roślin, potencjał biokontrolny oraz mechanizmy zwiększające tolerancję na stres środowiskowy. Jednym z najlepiej udokumentowanych mechanizmów PGP jest produkcja IAA, wpływającego na rozwój oraz architekturę systemu korzeniowego [Glick, 2012]. U szczepu C1 wykazano zdolność produkcji tego związku oraz obecność determinant związanych z jego biosyntezą [Luziatelli i in., 2020a]. Badania metabolitów wytwarzanych przez roślinno-korzystne szczepy *P. agglomerans* wskazują również, że produkty ich metabolizmu mogą wpływać na proces ukorzeniania i parametry wzrostu materiału roślinnego [Luziatelli i in., 2020b; Luziatelli i in., 2020c]. Innym istotnym mechanizmem jest zwiększanie dostępności fosforu. W genomach szczepów P5 i CPHN2 opisano geny związane

z gospodarką fosforanową, co wskazuje na potencjalną zdolność tych bakterii do funkcjonowania w środowiskach o ograniczonej dostępności łatwo przyswajalnych form tego pierwiastka [Shariati i in., 2017; Kumar i in., 2022]. W przypadku szczepu C1 opisano ponadto systemy związane z metabolizmem oraz transportem fosforanów [Luziatelli i in., 2020a]. Istotne znaczenie przypisuje się biosyntezie sideroforów. Oprócz podstawowej roli w pozyskiwaniu żelaza związki te mogą wpływać na konkurencję między mikroorganizmami, ograniczając dostępność tego pierwiastka dla innych członków mikrobiomu [Glick, 2012; Luziatelli i in., 2020a]. Potencjał biokontrolny *P. agglomerans* jest szczególnie dobrze udokumentowany w przypadku zarazy ogniowej. Badania nad szczepem Eh252 wykazały, że ograniczenie rozwoju *E. amylovora* wynika ze współdziałania różnych mechanizmów. Produkcja substancji przeciwdrobnoustrojowych odgrywa istotną rolę, jednak znaczenie mają również konkurencja o niszę oraz zasoby [Stockwell i in., 2002]. Oznacza to, że właściwości biokontrolnych szczepu nie należy utożsamiać wyłącznie z produkcją pojedynczego metabolitu. Równie interesujące są właściwości związane z tolerancją na stres środowiskowy. U szczepu C1 opisano tolerancję arsenianu oraz obecność determinant związanych z odpowiedzią na różne metale [Luziatelli i in., 2020a]. Z kolei badania EPS-produkującego izolatu *P. agglomerans* wykazały, że stres metalami ciężkimi wpływał na ilość i skład wytwarzanych egzopolisacharydów [Mohite i in., 2018]. Dane te wskazują na możliwość dalszego badania wybranych szczepów w kontekście bioremediacji oraz wspomagania funkcjonowania roślin w środowiskach obciążonych chemicznie.

Tabela 1. Potencjalne kierunki aplikacyjnego wykorzystania *Pantoea agglomerans*

Obszar	Wybrane właściwości	Potencjalne znaczenie	Wybrane źródła
Promowanie wzrostu roślin	Iaa, siderofory, gospodarka fosforanowa	Rozwój systemu korzeniowego i zwiększenie dostępności składników	Luziatelli i in. [2020a]; shariati i in. [2017]; kumar i in. [2022]
Biokontrola	Konkurencja o niszę, antybioza	Ograniczanie rozwoju fitopatogenów	Stockwell i in. [2002]; walterson i stavrinides [2015]
Adaptacja środowiskowa	Plastyczność metaboliczna i genomowa	Kolonizacja różnych nisz	Walterson i stavrinides [2015]; dahiya i in. [2024]
Bioremediacja	Tolerancja na metale, produkcja eps	Potencjalne zastosowanie w środowiskach zanieczyszczonych	Mohite i in. [2018]; luziatelli i in. [2020a]
Biotechnologia metabolitów	Klastry biosyntetyczne	Selekcja szczepów do dalszej charakterystyki	Walterson i in. [2014]; Kirk i in. [2024]

Źródło: opracowanie własne na podstawie cytowanej literatury.

3.2. Podstawowa charakterystyka fenotypowa i biochemiczna szczepu *Pantoea agglomerans* 113

Analiza mikroskopowa szczepu 113 po barwieniu metodą Grama wykazała obecność Gram-ujemnych komórek o morfologii pałeczek. Komórki występowały pojedynczo oraz w niewielkich skupiskach i krótkich układach komórkowych [Ryc. 1]. Uzyskany obraz był

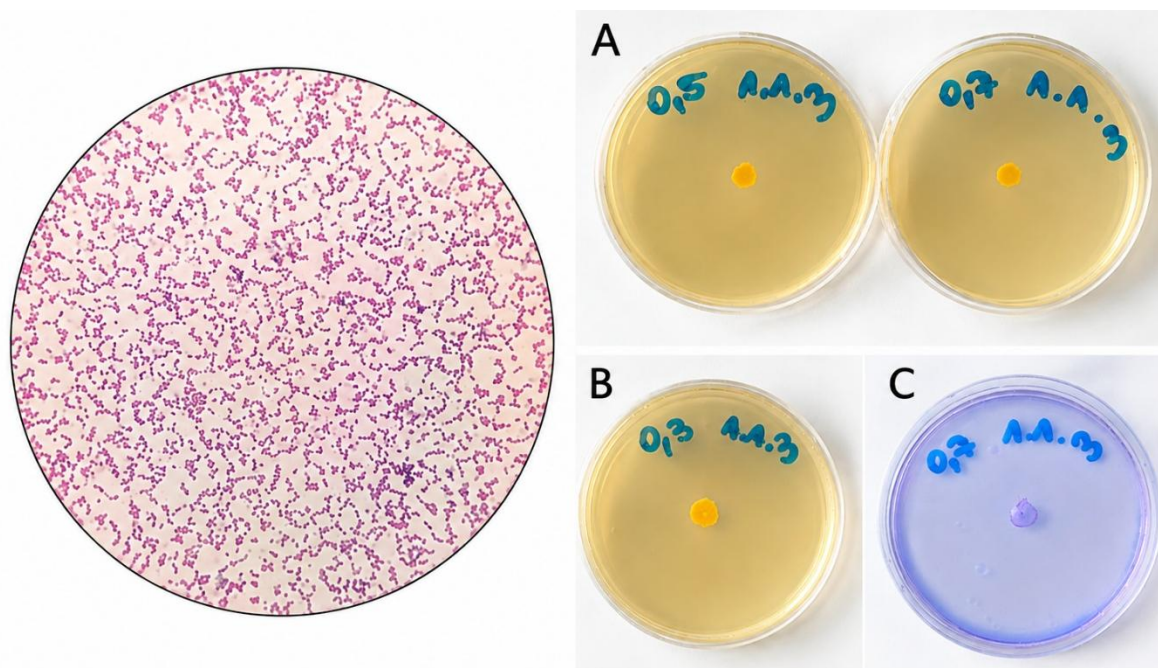
zgodny z podstawową charakterystyką rodzaju *Pantoea* i gatunku *P. agglomerans* opisywaną w literaturze [Rezzonico i in., 2009; Walterson i Stavrinides, 2015].

Przeprowadzona charakterystyka biochemiczna wskazała na zdolność szczepu 113 do wykorzystania zróżnicowanych substratów węglowych, w tym skrobi, maltozy i laktozy. Wynik ten wpisuje się w opisywaną dla przedstawicieli *P. agglomerans* plastyczność metaboliczną. Zdolność do korzystania z różnych źródeł węgla może zwiększać możliwości funkcjonowania bakterii w środowiskach charakteryzujących się zmienną dostępnością substancji odżywczych, jednak zakres tych właściwości należy traktować jako cechę konkretnego szczepu. W badaniach ruchliwości wykazano obecność ruchliwości typu swimming, swarming oraz twitching [Ryc. 1.]. Uzyskany profil wskazuje, że badany izolat posiada mechanizmy umożliwiające przemieszczanie się w środowisku półpłynnym oraz po powierzchniach. Cechy te mogą mieć znaczenie ekologiczne w kontekście zasiedlania określonych nisz, jednak na podstawie samych testów ruchliwości nie można określić efektywności kolonizacji roślin w warunkach naturalnych. Obserwacje mikroskopowe po barwieniu fluorescencyjnym wykazały również zdolność szczepu do formowania struktur biofilmowych. Widoczne były zarówno układy rozproszone, jak i bardziej zwarte agregaty komórkowe [Ryc. 2]. Tworzenie biofilmu może sprzyjać stabilizacji populacji na zasiedlanej powierzchni oraz zwiększać jej odporność na zmienne warunki środowiskowe. Podobnie jak w przypadku ruchliwości, sama obecność tej cechy nie stanowi jednak dowodu określonych właściwości aplikacyjnych.

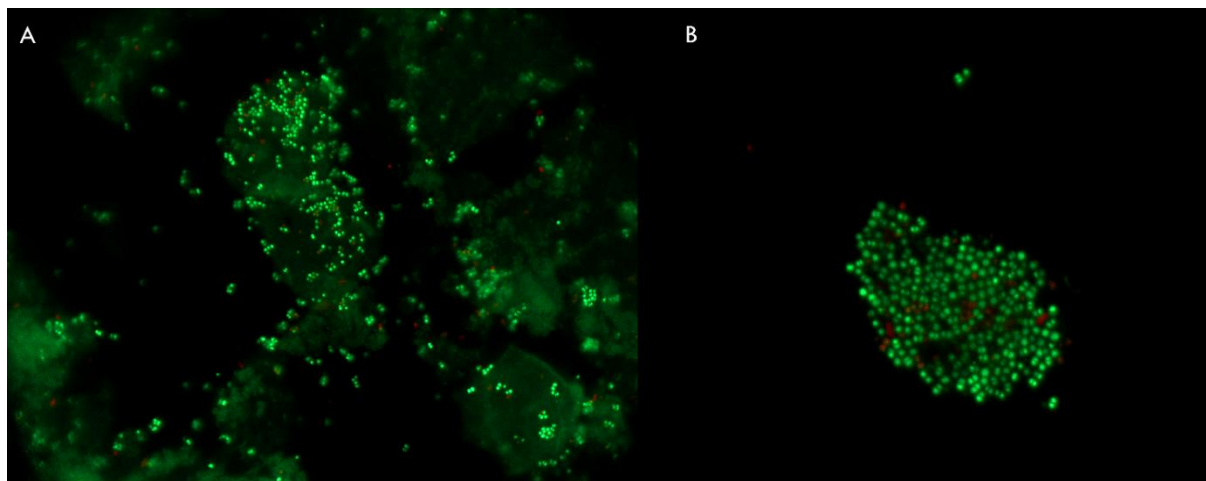
Tabela 2. Wybrane cechy fenotypowe i biochemiczne szczepu *Pantoea agglomerans* 113

Badana cecha	Obserwacja
Barwienie metodą grama	Gram-ujemna
Morfologia komórek	Pałeczki
Wykorzystanie substratów węglowych	Wykorzystanie zróżnicowanych substratów, m.in. Skrobi, maltozy i laktozy
Swimming	Obecna
Swarming	Obecna
Twitching	Obecna
Tworzenie biofilmu	Obecne

Źródło: opracowanie własne.



Rycina 1. Charakterystyka morfologiczna i ruchliwość szczepu *Pantoea agglomerans* 113. Po lewej: obraz mikroskopowy komórek po barwieniu metodą Grama, wskazujący na Gram-ujemną morfologię pałeczkowatą. Po prawej: wyniki testów ruchliwości na podłożach LB o różnym stężeniu agaru: (A) ruchliwość typu swarming na podłożach zawierających 0,5% i 0,7% agaru, (B) ruchliwość typu swimming na podłożu zawierającym 0,3% agaru, (C) ruchliwość typu twitching na podłożu zawierającym 0,7% agaru po wybarwieniu fioletem krystalicznym. Źródło: opracowanie własne.



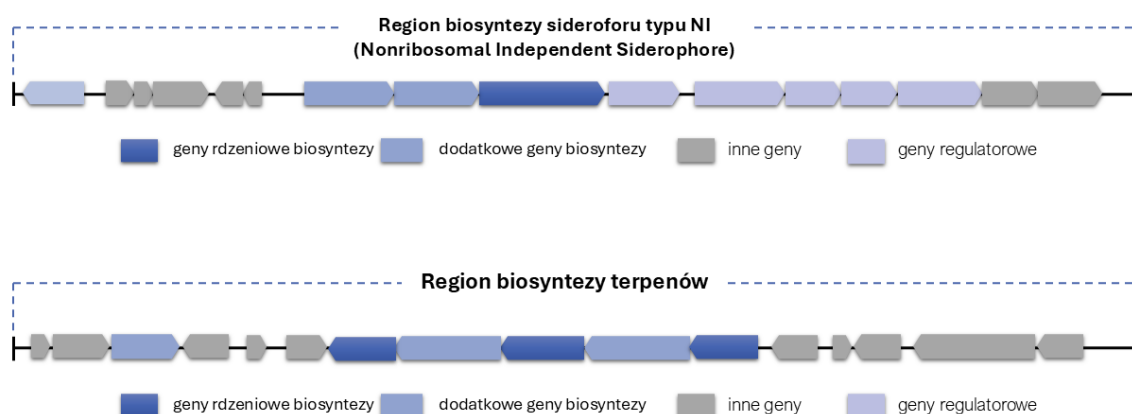
Rycina 2. Zdjęcia wykonane mikroskopem fluorescencyjnym preparatu biofilmu bakterii *P. agglomerans*. (A) luźne struktury rozproszone biofilmu; (B) zwarte agregaty komórkowe

3.3. Analiza potencjału biosyntetycznego szczepu 113 z wykorzystaniem antiSMASH

Uzupełnieniem podstawowej charakterystyki badanego izolatu była analiza genomowa ukierunkowana na identyfikację regionów potencjalnie związanych z biosyntezą metabolitów wtórnych. W tym celu wykorzystano program antiSMASH, który umożliwia wykrywanie

charakterystycznych układów genów tworzących biosyntetyczne klastry genowe [Blin i in., 2023].

Analiza genomu szczepu *P. agglomerans* 113 wskazała na obecność dwóch regionów zaklasyfikowanych jako potencjalne klastry biosyntezy metabolitów wtórnych. Pierwszy z nich został określony jako region związany z biosyntezą sideroforu (*NI-siderophore biosynthetic region*), natomiast drugi jako region związany z biosyntezą terpenów (*terpene biosynthetic region*). Obecność regionu sideroforowego jest interesująca w kontekście danych dotyczących innych szczepów *P. agglomerans*. Systemy związane z pozyskiwaniem żelaza oraz biosyntezą sideroforów opisywano m.in. dla szczepów C1, P5 i CPHN2 [Shariati i in., 2017; Luziatelli i in., 2020a; Kumar i in., 2022]. Siderofory mogą uczestniczyć zarówno w pozyskiwaniu żelaza przez bakterie, jak i w konkurencji z innymi mikroorganizmami o ten pierwiastek. Identyfikacja regionu związanego z biosyntezą terpenów wskazuje natomiast na obecność dodatkowego potencjału biosyntetycznego badanego szczepu. Interpretacja tego wyniku powinna pozostać ostrożna. Analiza antiSMASH ma charakter predykcyjny, dlatego wykrycie biosyntetycznego klastra genowego nie jest jednoznaczne z produkcją odpowiadającego mu metabolitu w zastosowanych warunkach hodowli. Wyniki antiSMASH należy zatem traktować jako wskazanie kierunku dalszych badań, a nie jako potwierdzenie określonych właściwości metabolicznych. Weryfikacja aktywności zidentyfikowanych regionów wymagałaby zastosowania dodatkowych metod, w tym analiz ekspresji genów oraz metod metabolomicznych. Obserwowane wyniki wpisują się w szerszy obraz rodzaju *Pantoea* jako grupy bakterii charakteryzujących się znacznym zróżnicowaniem potencjału biosyntetycznego. W obrębie rodzaju identyfikowano klastry genowe związane z produkcją różnych naturalnych związków przeciwdrobnoustrojowych, których występowanie i organizacja mogą różnić się pomiędzy szczepami [Walterson i in., 2014; Kirk i in., 2024]. Analiza BGC może zatem stanowić wartościowy element wstępnej charakterystyki izolatów przeznaczonych do dalszych badań funkcjonalnych.



Rycina 3. Zidentyfikowane klastry biosyntezy metabolitów wtórnych w genomie szczepu *Pantoea agglomerans* 113 uzyskane przy użyciu programu antiSMASH

Źródło: opracowanie własne.

4. Podsumowanie

Pantoea agglomerans jest gatunkiem charakteryzującym się znaczną zmiennością szczepową oraz szerokim zakresem możliwych interakcji ze środowiskiem. Właściwości poszczególnych izolatów mogą znacząco się różnić, dlatego potencjał aplikacyjny bakterii powinien być analizowany na poziomie konkretnego szczepu [Walterson i Stavrinides, 2015; Rezzonico i in., 2009]. Część szczepów związanych z roślinami wykazuje cechy typowe dla PGPB, obejmujące m.in. produkcję IAA, zwiększanie dostępności fosforu oraz pozyskiwanie żelaza za pośrednictwem sideroforów [Glick, 2012; Shariati i in., 2017; Luziatelli i in., 2020a; Kumar i in., 2022]. Właściwości te, w połączeniu z mechanizmami zwiększającymi tolerancję na stres środowiskowy, uzasadniają zainteresowanie wybranymi szczepami w kontekście biotechnologii rolniczej i środowiskowej. Dobrze udokumentowanym przykładem praktycznego potencjału *P. agglomerans* pozostaje biologiczna kontrola zarazy ogniowej. Badania nad szczepem Eh252 wskazują, że jego działanie wynika ze współdziału antybiozy i innych mechanizmów związanych m.in. z konkurencją o niszę [Stockwell i in., 2002]. Pokazuje to jednocześnie, że właściwości użytkowe bakterii mają charakter wieloczynnikowy i nie powinny być oceniane wyłącznie na podstawie obecności pojedynczego mechanizmu. Przeprowadzona charakterystyka szczepu *P. agglomerans* 113 wykazała podstawowe cechy fenotypowe zgodne z ogólną charakterystyką gatunku. Badany izolat był Gram-ujemną pałeczką, wykazywał zdolność wykorzystywania zróżnicowanych substratów węglowych, ruchliwość typu swimming, swarming i twitching oraz zdolność formowania biofilmu. Cechy te mogą wspierać funkcjonowanie bakterii w zmiennych warunkach środowiskowych, jednak nie stanowią samodzielnego potwierdzenia właściwości użytkowych. Istotnym uzupełnieniem charakterystyki była analiza potencjału biosyntetycznego wykonana z wykorzystaniem programu antiSMASH. W genomie szczepu 113 wykryto region potencjalnie związany z biosyntezą sideroforu oraz region terpenowy. Szczególnie wynik dotyczący sideroforów pozostaje zgodny z profilem funkcjonalnym opisywanym dla niektórych roślinno-związanych szczepów *P. agglomerans*. Jednocześnie predykcyjny charakter analizy oznacza, że obecność klastra nie jest dowodem rzeczywistego wytwarzania danego metabolitu.

Uzyskane wyniki pozwalają traktować szczep 113 jako interesujący materiał do dalszych badań, nie uzasadniają jednak na obecnym etapie jednoznacznego przypisania mu określonego zastosowania biotechnologicznego. W przypadku *P. agglomerans* szczególne znaczenie ma podejście szczepozależne, ponieważ właściwości opisane dla jednego izolatu nie mogą być automatycznie przenoszone na pozostałych przedstawicieli gatunku. Połączenie klasycznych metod mikrobiologicznych, charakterystyki biochemicznej oraz analizy potencjału biosyntetycznego może stanowić użyteczne narzędzie wstępnej selekcji środowiskowych izolatów *P. agglomerans*. Dalsze badania powinny obejmować eksperymentalną walidację cech wskazanych przez analizy genomowe oraz równoległą ocenę bezpieczeństwa biologicznego. Dopiero zestawienie takich danych pozwoli wiarygodnie określić rzeczywisty potencjał badanego szczepu w biotechnologii rolniczej lub środowiskowej.

Bibliografia:

1. Anderson L.M., Stockwell V.O., Loper J.E. (2004). An extracellular protease of *Pseudomonas fluorescens* inactivates antibiotics of *Pantoea agglomerans*. *Phytopathology*, 94(11), 1228–1234. <https://doi.org/10.1094/PHYTO.2004.94.11.1228>.
2. Barash I., Manulis-Sasson S. (2009). Recent evolution of bacterial pathogens: the gall-forming *Pantoea agglomerans* case. *Annual Review of Phytopathology*, 47, 133–152.
3. Bianco C. (2024). Plant-Growth-Promoting Bacteria. *Plants*, 13. <https://doi.org/10.3390/plants13101323>.
4. Blin K., Shaw S., Augustijn H.E., Reitz Z.L., Biermann F., Alanjary M., Fetter A., Terlouw B.R., Metcalf W.W., Helfrich E.J.N., van Wezel G.P., Medema M.H., Weber T. (2023). antiSMASH 7.0: new and improved predictions for detection, regulation, chemical structures and visualisation. *Nucleic Acids Research*, 51(W1), W46–W50.
5. Bonaterra A., Badosa E., Rezzonico F., Duffy B., Montesinos E. (2014). Phenotypic comparison of clinical and plant-beneficial strains of *Pantoea agglomerans*. *International Microbiology*, 17(2), 81–90. <https://doi.org/10.2436/20.1501.01.210>.
6. Dagher F., Nickzad A., Zheng J., Hoffmann M., Déziel E. (2021). Characterization of the biocontrol activity of three bacterial isolates against the phytopathogen *Erwinia amylovora*. *MicrobiologyOpen*, 10, e1202. <https://doi.org/10.1002/mbo3.1202>.
7. Dahiya P., Kumar P., Rani S., Dang A., Suneja P. (2024). Comparative genomic and functional analyses for insights into *Pantoea agglomerans* strains adaptability in diverse ecological niches. *Current Microbiology*, 81. <https://doi.org/10.1007/s00284-024-03763-0>.
8. de Souza R., Ambrosini A., Passaglia L.M.P. (2015). Plant growth-promoting bacteria as inoculants in agricultural soils. *Genetics and Molecular Biology*, 38(4), 401–419. <https://doi.org/10.1590/S1415-475738420150053>.
9. Dutkiewicz J., Maćkiewicz B., Lemieszek M.K., Golec M., Milanowski J. (2016). *Pantoea agglomerans*: a mysterious bacterium of evil and good. Part IV. Beneficial effects. *Annals of Agricultural and Environmental Medicine*, 23(2), 206–222. <https://doi.org/10.5604/12321966.1203879>.
10. Ficca A.G., Luziatelli F., Jaoudé R.A., Ruzzi M. (2025). Integrative genomics and metabolomics analyses provide new insights into the molecular basis of plant growth promotion by *Pantoea agglomerans*. *Microorganisms*, 13, 2138. <https://doi.org/10.3390/microorganisms13092138>.
11. Glick B.R. (2012). Plant growth-promoting bacteria: mechanisms and applications. *Scientifica*, 2012, 963401. <https://doi.org/10.6064/2012/963401>.
12. Kirk A., Davidson E., Stavrinides J. (2024). The expanding antimicrobial diversity of the genus *Pantoea*. *Microbiological Research*, 289, 127923. <https://doi.org/10.1016/j.micres.2024.127923>.
13. Kumar P., Rani S., Dahiya P., Kumar A., Dang A., Suneja P. (2022). Whole genome analysis for plant growth promotion profiling of *Pantoea agglomerans* CPHN2, a non-rhizobial nodule endophyte. *Frontiers in Microbiology*, 13, 998821. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2022.998821>.
14. Luziatelli F., Ficca A.G., Cardarelli M., Melini F., Cavalieri A., Ruzzi M. (2020a). Genome sequencing of *Pantoea agglomerans* C1 provides insights into molecular and

- genetic mechanisms of plant growth-promotion and tolerance to heavy metals. *Microorganisms*, 8(2), 153. <https://doi.org/10.3390/microorganisms8020153>.
15. Luziatelli F., Ficca A.G., Bonini P., Muleo R., Gatti L., Meneghini M., Tronati M., Melini F., Ruzzi M. (2020b). A genetic and metabolomic perspective on the production of indole-3-acetic acid by *Pantoea agglomerans* and use of their metabolites as biostimulants in plant nurseries. *Frontiers in Microbiology*, 11. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2020.01475>.
 16. Luziatelli F., Gatti L., Ficca A.G., Medori G., Silvestri C., Melini F., Muleo R., Ruzzi M. (2020c). Metabolites secreted by a plant-growth-promoting *Pantoea agglomerans* strain improved rooting of *Pyrus communis* L. cv. Dar Gazi cuttings. *Frontiers in Microbiology*, 11, 539359. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2020.539359>.
 17. Mohite B.V., Koli S.H., Patil S.V. (2018). Heavy metal stress and its consequences on exopolysaccharide (EPS)-producing *Pantoea agglomerans*. *Applied Biochemistry and Biotechnology*, 186, 199–216. <https://doi.org/10.1007/s12010-018-2727-1>.
 18. Rezzonico F., Smits T.H.M., Montesinos E., Frey J.E., Duffy B. (2009). Genotypic comparison of *Pantoea agglomerans* plant and clinical strains. *BMC Microbiology*, 9, 204. <https://doi.org/10.1186/1471-2180-9-204>.
 19. Rezzonico F., Smits T.H.M., Duffy B. (2012). Misidentification slanders *Pantoea agglomerans* as a serial killer. *Journal of Hospital Infection*, 81(2), 137–139. <https://doi.org/10.1016/j.jhin.2012.02.013>.
 20. Shariati J.V., Malboobi M.A., Tabrizi Z., Tavakol E., Owlia P., Safari M. (2017). Comprehensive genomic analysis of a plant growth-promoting rhizobacterium *Pantoea agglomerans* strain P5. *Scientific Reports*, 7, 15610. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-15820-9>.
 21. Smits T.H.M., Rezzonico F., Blom J., Goesmann A., Abelli A., Morelli R.K., Vanneste J.L., Duffy B. (2015). Draft genome sequence of the commercial biocontrol strain *Pantoea agglomerans* P10c. *Genome Announcements*, 3. <https://doi.org/10.1128/genomeA.01448-15>.
 22. Stockwell V.O., Johnson K.B., Sugar D., Loper J.E. (2002). Antibiosis contributes to biological control of fire blight by *Pantoea agglomerans* strain Eh252 in orchards. *Phytopathology*, 92(11), 1202–1209. <https://doi.org/10.1094/PHYTO.2002.92.11.1202>.
 23. Walterson A.M., Smith D., Stavriniades J. (2014). Identification of a *Pantoea* biosynthetic cluster that directs the synthesis of an antimicrobial natural product. *PLoS ONE*, 9. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0096208>.
 24. Walterson A.M., Stavriniades J. (2015). *Pantoea*: insights into a highly versatile and diverse genus within the Enterobacteriaceae. *FEMS Microbiology Reviews*, 39(6), 968–984. <https://doi.org/10.1093/femsre/fuv027>.
 25. Wang S., Ghosh A.K., Bongio N., Stebbings K.A., Lampe D.J., Jacobs-Lorena M. (2012). Fighting malaria with engineered symbiotic bacteria from vector mosquitoes. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 109(31), 12734–12739. <https://doi.org/10.1073/pnas.1204158109>.

2. SZTUCZNA INTELIGENCJA W MEDYCYNIE ESTETYCZNEJ. AKTUALNE ZASTOSOWANIA, WYZWANIA I PERSPEKTYWY ROZWOJU

Hubert Sztac, Kalina Bandura

Uniwersytet Jana Długosza w Częstochowie

Collegium Medicum im. dr. Władysława Biegańskiego

Al. Armii Krajowej 13/15, 42-200 Częstochowa

E-mail: hsztac@wp.pl

1. Wstęp

Rozwój sztucznej inteligencji w ostatniej dekadzie w sposób istotny zmienia sposób funkcjonowania wielu dziedzin medycyny, a medycyna estetyczna nie stanowi tu wyjątku. Algorytmy uczenia maszynowego i głębokiego znajdują zastosowanie zarówno w diagnostyce dermatologicznej, jak i w planowaniu zabiegów chirurgicznych oraz niechirurgicznych, oferując narzędzia wspierające obiektywizację ocen, które tradycyjnie opierały się niemal wyłącznie na subiektywnej opinii klinicysty [Frank i in., 2024]. Globalny rynek niechirurgicznych zabiegów estetycznych ma osiągnąć wartość 90,2 miliarda dolarów do 2030 roku, przy czym istotny udział w tym wzroście przypada regionowi Azji, w szczególności Chinom [Li i in., 2026]. Rosnące zainteresowanie pacjentów procedurami estetycznymi, w połączeniu z postępem technologicznym, sprzyja wdrażaniu rozwiązań opartych na sztucznej inteligencji na każdym etapie opieki nad pacjentem, od wstępnej konsultacji, przez planowanie leczenia, aż po monitorowanie efektów terapeutycznych.

Sztuczna inteligencja pierwotnie znalazła zastosowanie w ogólnej dermatologii, między innymi w wykrywaniu nowotworów skóry, gdzie algorytmy przewyższyły w niektórych zadaniach skuteczność dermatologów [Eapen, 2020]. Z czasem obszar zastosowań rozszerzył się na dermatologię estetyczną oraz szeroko pojętą medycynę estetyczną, obejmując analizę stanu skóry, wsparcie diagnostyczne, optymalizację leczenia oraz edukację pacjenta [Chen i in., 2025]. Coraz częściej podkreśla się, że algorytmy sztucznej inteligencji mogą standaryzować przebieg konsultacji, zapobiegać nadmiernej korekcji efektów zabiegów oraz umożliwiać wykorzystanie obiektywnych wskaźników oceny estetycznej, uwzględniających płeć, wiek i pochodzenie etniczne pacjenta [Frank i in., 2024].

Celem niniejszej pracy jest przedstawienie aktualnego stanu wiedzy na temat zastosowań sztucznej inteligencji w medycynie estetycznej, ze szczególnym uwzględnieniem dermatologii estetycznej, chirurgii estetycznej twarzy, zabiegów niechirurgicznych oraz nowego kierunku, jakim jest kosmetogenomika. Omówiono również najważniejsze wyzwania związane z jakością dowodów naukowych, różnorodnością populacji badanych oraz kwestiami etycznymi, a także perspektywy dalszego rozwoju tej dziedziny.

2. Materiał i metody

Praca ma charakter przeglądu narracyjnego. Analizie poddano siedemnaście publikacji anglojęzycznych, opublikowanych w latach 2020–2026 w recenzowanych czasopismach naukowych, w tym: *Aesthetic Plastic Surgery*, *Journal of Cosmetic Dermatology*, *Dermatology and Therapy*, *Frontiers in Artificial Intelligence*, *Indian Dermatology Online Journal*, *Aesthetic Surgery Journal Open Forum* oraz *Cureus*. Analizowany materiał obejmował przeglądy systematyczne, przeglądy narracyjne, dokument konsensusu ekspertów oraz badania oryginalne, poświęcone zastosowaniu sztucznej inteligencji w następujących obszarach medycyny estetycznej: obiektywizacji oceny wyglądu twarzy i standaryzacji konsultacji pacjenta, dermatologii estetycznej, chirurgii estetycznej twarzy (w tym liftingu twarzy, rinoplastyce i blefaroplastyce), zabiegach niechirurgicznych oraz kosmetogenomice. Do doboru piśmiennictwa zastosowano kryterium tematyczne, uwzględniając wyłącznie prace dotyczące wykorzystania algorytmów sztucznej inteligencji, uczenia maszynowego lub uczenia głębokiego w kontekście estetycznym, z wyłączeniem prac koncentrujących się wyłącznie na zastosowaniach czysto diagnostycznych, niezwiązanych z estetyką. Ze względu na istotną heterogeniczność metodologiczną analizowanych źródeł, obejmującą zróżnicowanie projektów badań, wielkości prób oraz sposobów raportowania wyników, przyjęto syntezę narracyjną jako właściwą formę prezentacji zebranych danych.

3. Wyniki i dyskusja

Obiektywizacja oceny estetycznej i standaryzacja konsultacji pacjenta

Ocena wyglądu twarzy w medycynie estetycznej opierała się dotychczas przede wszystkim na skalach klinicznych, które choć stanowią najbliższe dostępne narzędzie obiektywnego pomiaru, koncentrują się zwykle na wybranym obszarze anatomicznym i pozostają zależne od subiektywnej interpretacji osoby oceniającej [Frank i in., 2024]. W grudniu 2023 roku międzynarodowa grupa ekspertów z zakresu chirurgii plastycznej i dermatologii, określana jako AI Consensus Group, podjęła prace nad wypracowaniem wytycznych dotyczących rozwoju i stosowania sztucznej inteligencji w medycynie estetycznej [Frank i in., 2024]. W ankiecie poprzedzającej spotkanie konsensusowe uczestnicy wskazali zapobieganie nadmiernej korekcji efektów zabiegów, identyfikację opcji terapeutycznych oraz monitorowanie przebiegu leczenia jako najważniejsze zastosowania sztucznej inteligencji, a znaczenie wprowadzenia narzędzi obiektywizujących badanie twarzy oceniono przeciętnie na 8,2 ($\pm 1,1$) w skali dziesięciopunktowej [Frank i in., 2024].

Wynikiem prac konsensusowych było między innymi rekomendowanie stosowania złożonych wskaźników oceny estetycznej, takich jak Facial Aesthetic Index (FAI), Facial Youth Index (FYI) oraz Skin Quality Index (SQI), umożliwiających ocenę uwzględniającą płeć oraz wiek pacjenta, przy założeniu wykonania badania na twarzy pozbawionej makijażu [Frank i in., 2024]. Eksperci jednomyślnie uznali także za konieczne uwzględnianie pochodzenia etnicznego pacjenta w algorytmach oceniających, wskazując na udokumentowane różnice w zakresie fototypu skóry, proporcji twarzy oraz cech starzenia się pomiędzy poszczególnymi grupami populacyjnymi [Frank i in., 2024]. Podkreślono przy tym ryzyko, że algorytmy trenowane na niereprezentatywnych zbiorach danych mogą utrzymywać wąsko rozumiany, jednorodny kulturowo wzorzec piękna, dlatego postulowano

interdyscyplinarną współpracę łączącą chirurgię plastyczną, dermatologię, antropologię oraz psychologię przy tworzeniu tego typu narzędzi [Frank i in., 2024].

Praktycznym przykładem wdrożenia wskaźników FAI, FYI i SQI jest platforma CAARISMA ARMM, łącząca wymienione miary w celu uzyskania obiektywnej, pooperacyjnej oceny efektów leczenia, między innymi w transplantacji twarzy, gdzie osiągnięto współczynnik korelacji wewnątrzklasowej na poziomie 0,89 dla oceny poprawy estetycznej [Li i in., 2026]. Pooth i wsp. zaprezentowali także przykład zastosowania klinicznego tego typu narzędzia w postaci podłużnej obserwacji pacjentki poddawanej terapii wielomodalnej, u której wartości wskaźników FAI, FYI oraz SQI rejestrowano na wizycie wyjściowej oraz po kolejnych konsultacjach, co pozwoliło na ustrukturyzowane śledzenie postępów leczenia w czasie [Pooth i in., 2025].

Sztuczna inteligencja w dermatologii estetycznej

Dermatologia jest dziedziną medycyny w znacznym stopniu opartą na obrazie, co czyni ją naturalnym obszarem zastosowań algorytmów analizy wizualnej [Chen i in., 2025]. Sztuczna inteligencja, początkowo wykorzystywana głównie w diagnostyce ogólnodermatologicznej, w tym w wykrywaniu zmian nowotworowych skóry, z czasem znalazła zastosowanie również w dermatologii estetycznej, wspierając ocenę stanu skóry, diagnostykę, optymalizację leczenia oraz edukację pacjenta [Eapen, 2020; Chen i in., 2025]. W odróżnieniu od dermatologii diagnostycznej, w której standaryzacja metod oceny jest już relatywnie zaawansowana, dermatologia estetyczna wciąż zмага się z subiektywnością oceny oraz brakiem ujednoliconych narzędzi pomiarowych [Thunga i in., 2025].

Rozwijane są algorytmy analizujące dane multimodalne, łączące obrazy skóry z dodatkowymi parametrami klinicznymi. Przykładem jest metoda łącząca sieci Mask R-CNN oraz YOLO v4, umożliwiająca wykrywanie trądziku, przebarwień oraz zmarszczek nawet przy ograniczonej liczbie danych treningowych [Chen i in., 2025]. W obszarze bezpieczeństwa zabiegów laserowych opracowano sieci głębokiego uczenia zdolne do przewidywania temperatury tkanek podskórnych w czasie rzeczywistym, co ma ograniczać ryzyko oparzeń i podrażnień skóry [Chen i in., 2025]. Podobną funkcję pełni sztuczna inteligencja wspomagająca obrazowanie ultrasonograficzne w medycynie estetycznej twarzy. Algorytmy uczenia maszynowego standaryzują pozyskiwanie obrazu USG, automatyzują rozpoznawanie struktur anatomicznych (naczyń krwionośnych, nerwów, przedziałów tłuszczowych) oraz umożliwiają nadzór w czasie rzeczywistym podczas iniekcji wypełniaczy, ograniczając ryzyko powikłań naczyniowych i uszkodzeń nerwów [Haykal i in., 2025b]. Zastosowanie znajduje również w ocenie pooperacyjnej, wspierając wczesne wykrywanie powikłań, takich jak krwiaki czy migracja wypełniacza [Haykal i in., 2025b]. Innym przykładem personalizacji leczenia jest wykorzystanie trójwymiarowego modelowania twarzy do przewidywania dawki iniekcyjnej na podstawie cech anatomicznych, gdzie modele Rejuv3DNet oraz regresji jądrowej osiągnęły dokładność predykcji na poziomie odpowiednio 62,5% oraz 66,7% na rzeczywistym zbiorze danych [Chen i in., 2025]. Szczegółowym przykładem zastosowania podobnych narzędzi jest ocena i monitorowanie melasmy, czyli przewlekłej choroby hiperpigmentacyjnej o dużym znaczeniu psychospołecznym. Algorytmy uczenia maszynowego, analizując obrazy skóry, umożliwiają wczesne wykrywanie zmian oraz obiektywną ocenę nasilenia melasmy, a systemy oparte na sztucznej inteligencji,

zintegrowane z obrazowaniem dermatologicznym, pozwalają na nieinwazyjne monitorowanie zmian pigmentacji w czasie i ocenę skuteczności leczenia [Liao i in., 2026]. Analiza danych dotyczących gospodarki hormonalnej, ekspozycji na promieniowanie UV oraz czynników genetycznych umożliwia ponadto predykcję ryzyka nawrotu choroby [Liao i in., 2026].

Istotnym ograniczeniem pozostaje niedostateczna reprezentacja zróżnicowanych fototypów skóry w zbiorach danych wykorzystywanych do trenowania algorytmów. Wskazuje się na przykład, że część algorytmów analizy obrazu skóry była walidowana głównie na danych pochodzących od populacji chińskiej, co ogranicza możliwość generalizacji wyników na inne grupy etniczne i fototypy skóry [Aguglia i in., 2026]. Eapen zwraca ponadto uwagę, że brak standaryzacji obrazów klinicznych oraz obawy dotyczące prywatności danych pacjentów stanowią jedne z głównych barier ograniczających powszechne wdrożenie sztucznej inteligencji w dermatologii, podkreślając rolę dermatologów w standaryzowanym gromadzeniu danych oraz klinicznej walidacji rozwijanych narzędzi [Eapen, 2020].

Sztuczna inteligencja w chirurgii estetycznej twarzy

Zastosowanie sztucznej inteligencji, rzeczywistości rozszerzonej oraz robotyki w zabiegach kosmetycznych było przedmiotem przeglądu systematycznego przeprowadzonego zgodnie z wytycznymi PRISMA 2020, w którym spośród 12316 przeszukanych publikacji jedynie 55 (0,5%) spełniło kryteria włączenia, przy czym prace te opublikowano w latach 2009–2025 [Aguglia i in., 2026]. Większość włączonych badań (60%) dotyczyła analizy obrazu opartej na sztucznej inteligencji, umożliwiającej obiektywną kwantyfikację cech skóry oraz planowanie objętościowe w chirurgii piersi i twarzy, natomiast robotyka (16%) oraz rzeczywistość rozszerzona (15%) stanowiły mniejszy, choć rosnący udział zastosowań [Aguglia i in., 2026]. Jakość metodologiczna analizowanych badań była ogólnie niska do umiarkowanej.

W kontekście liftingu twarzy wskazuje się na obiecujące wyniki badań kadawerowych, w których robotyka umożliwiła precyzyjne, wolne od drżenia wykonanie platysmaplastyki przez dostęp typowy dla liftingu twarzy, natomiast w rzeźbieniu chrząstki żebrowej do rekonstrukcji koniuszka nosa osiągnięto submilimetrową precyzję, skracając czas zabiegu nawet o 8 minut [Aguglia i in., 2026]. Pierwszy kompleksowy przegląd systematyczny realnych zastosowań sztucznej inteligencji ograniczony wyłącznie do chirurgii estetycznej twarzy, uwzględniający etap opieki nad pacjentem, typ zabiegu oraz architekturę wykorzystywanych modeli, przeprowadzili Colceriu i wsp., stosując metodologię PRISMA oraz protokół zarejestrowany w bazie PROSPERO [Colceriu i in., 2026]. W obszarze blefaroplastyki zidentyfikowano zastosowania sztucznej inteligencji dotyczące szacowania wieku oraz automatycznego pomiaru struktur oka; oprogramowanie oparte na czterech komercyjnie dostępnych sieciach konwolucyjnych, przetestowane w grupie 150 pacjentów, wykazało istotną poprawę w zakresie worków pod oczami, zmarszczek dolnej powieki oraz ogólnej oceny estetycznej, a także obniżenie odsetka powikłań z 28% do 13% w porównaniu z tradycyjnymi metodami [Colceriu i in., 2026]. Ogólna ocena ryzyka błędu systematycznego w analizowanych badaniach nierandomizowanych wykazała niskie ryzyko jedynie w 25,9% przypadków, przy umiarkowanym ryzyku w 51,8% badań [Colceriu i in., 2026], co potwierdza obserwacje dotyczące ograniczonej jakości dowodów naukowych w tym obszarze.

W odniesieniu do rinoplastyki sztuczna inteligencja wspiera przede wszystkim planowanie przedoperacyjne poprzez symulację wyniku zabiegu, podejmowanie decyzji śródoperacyjnych oraz ocenę pooperacyjną [Eldaly i in., 2022]. Narzędzia oparte na rozpoznawaniu twarzy, wykorzystane w grupach liczących od 100 do 244 pacjentów, wykazały zdolność do interpretowania efektów rinoplastyki jako działania odmładzającego oraz poprawiającego atrakcyjność twarzy [Eldaly i in., 2022]. Rozwój technik rinoplastyki z zachowaniem struktur anatomicznych (tzw. preservation rhinoplasty) potwierdza tendencję do coraz bardziej precyzyjnego i zindywidualizowanego planowania zabiegu, choć jakość dowodów naukowych w tym obszarze pozostaje umiarkowana, co wykazał przegląd systematyczny obejmujący 13 badań i 855 pacjentów [Gucuk i in., 2026].

Sztuczna inteligencja w zabiegach niechirurgicznych i komunikacji z pacjentem

Dynamiczny wzrost rynku zabiegów niechirurgicznych, szacowanego na 90,2 miliarda dolarów do 2030 roku, sprzyja wdrażaniu rozwiązań opartych na sztucznej inteligencji na wszystkich etapach procesu terapeutycznego, od zindywidualizowanej oceny estetycznej i planowania leczenia po monitorowanie w czasie rzeczywistym oraz opiekę pozabiegową [Li i in., 2026]. Przykładem zastosowania uczenia maszynowego w planowaniu leczenia jest framework AutoGluon AutoML, który osiągnął dokładność na poziomie 82–88% w symulacji wyników rinoplastyki poprzez integrację przedoperacyjnych danych morfometrycznych z konsensusową oceną estetyczną [Li i in., 2026].

Coraz większą rolę w komunikacji z pacjentem odgrywają duże modele językowe. Wykazano, że ChatGPT dostarcza precyzyjnych informacji dotyczących toksyny botulinowej (77,1% odpowiedzi) oraz wypełniaczy skórnych (62,9%), a ponad 65% treści ocenionych przez lekarzy uznano za merytorycznie poprawne, jednak odpowiedzi charakteryzowały się niską zgodnością międzyocenającą oraz ograniczoną zdolnością do uwzględniania niuansów proceduralnych [Li i in., 2026]. W badaniu obserwacyjnym oceniającym zdolność ChatGPT do symulowania wstępnej konsultacji dotyczącej rinoplastyki, opartym na liście pytań opracowanej przez American Society of Plastic Surgeons, model udzielał spójnych i zrozumiałych odpowiedzi, podkreślając znaczenie zindywidualizowanego podejścia do pacjenta, jednak wykazywał ograniczenia w dostarczaniu bardziej szczegółowych i spersonalizowanych porad [Xie i in., 2023]. Autorzy podkreślili, że narzędzia tego typu mogą mieć szczególną wartość w sytuacjach, gdy pacjenci niechętnie korzystają z porady lekarskiej lub dostęp do niej jest ograniczony, zastrzegając jednocześnie potrzebę dalszych badań nad zakresem i ograniczeniami modeli językowych w tym kontekście [Xie i in., 2023].

Sztuczna inteligencja znajduje zastosowanie także w zabiegach z użyciem toksyny botulinowej, gdzie leczenie tradycyjnie w dużej mierze zależy od doświadczenia klinicysty, oceny anatomicznej oraz iteracyjnego dostosowywania dawki [Xu i in., 2026]. Al-Dhubaibi i wsp. wskazują, że zastosowania sztucznej inteligencji w medycynie estetycznej obejmują analizę twarzy, zabiegi wspomagane robotycznie oraz predykcyjne modelowanie wyników leczenia, podkreślając równocześnie konieczność krytycznej oceny wyzwań etycznych towarzyszących wdrażaniu tych technologii [Al-Dhubaibi i in., 2025].

Kosmetogenomika

Nowym, dynamicznie rozwijającym się kierunkiem jest kosmetogenomika, łącząca analizę genomyczną i proteomiczną z algorytmami sztucznej inteligencji w celu personalizacji pielęgnacji skóry [Haykali in., 2025b]. Postęp w sekwencjonowaniu genomu umożliwił identyfikację wariantów genetycznych wpływających na starzenie się skóry, funkcję barierową oraz odpowiedź na czynniki środowiskowe, co pozwala na odejście od uniwersalnych schematów pielęgnacyjnych na rzecz podejścia opartego na indywidualnych predyspozycjach genetycznych [Haykal i in., 2025b]. Pacjenci z markerami genetycznymi wskazującymi na obniżoną obronę antyoksydacyjną mogą odnosić korzyść z preparatów wzbogaconych w antyoksydanty, natomiast osoby z predyspozycją zapalną mogą lepiej reagować na związki przeciwzapalne [Haykal i in., 2025b]. Wpływ analizy genetycznej wykracza poza dobór preparatów miejscowych, obejmując również planowanie procedur zabiegowych, w tym doboru iniekcji, terapii laserowej oraz zabiegów regeneracyjnych, poprzez analizę wariantów genetycznych związanych z syntezą i degradacją kolagenu [Haykal i in., 2025b].

Integracja diagnostyki omicznej z obrazowaniem opartym na sztucznej inteligencji oraz teleporadami w czasie rzeczywistym umożliwia dynamiczne dostosowywanie schematów pielęgnacyjnych, stanowiąc przejście od statycznych zaleceń w kierunku rozwiązań opartych na bieżących danych [Haykal i in., 2025b]. Większość dostępnych dowodów pochodzi z badań obserwacyjnych, z ograniczoną liczbą badań randomizowanych, a te ostatnie wykazały istotne statystycznie korzyści w zakresie nawilżenia, elastyczności oraz tekstury skóry przy zastosowaniu interwencji spersonalizowanych na podstawie wariantów genetycznych [Haykal i in., 2025b]. Poważnym ograniczeniem pozostaje jednak fakt, że dowody pochodzą w nieproporcjonalnie dużym stopniu od osób o jaśniejszych fototypach skóry oraz z populacji krajów rozwiniętych, co istotnie ogranicza możliwość uogólnienia wyników [Haykal i in., 2025b]. Podnoszone są również istotne kwestie etyczne, w tym ryzyko dyskryminacji genetycznej w kontekście zatrudnienia lub ubezpieczeń, problem własności danych genetycznych oraz wyzwania regulacyjne związane z transgranicznym przekazywaniem danych [Haykal i in., 2025b].

Pokrewny kierunek badań stanowi zastosowanie sztucznej inteligencji w dermatologii ukierunkowanej na długowieczność skóry, gdzie algorytmy uczenia maszynowego analizują zbiory danych łączące predyspozycje genetyczne z czynnikami środowiskowymi w celu opracowania zindywidualizowanych planów terapeutycznych [Haykal i in., 2025c]. Autorzy zwracają jednak uwagę na ryzyko nadmiernego polegania na niezweryfikowanych modelach oraz postulują wprowadzenie jasnych standardów regulacyjnych dotyczących skuteczności, wyjaśnialności oraz odpowiedzialności klinicznej algorytmów wykorzystywanych w tym kontekście [Haykal i in., 2025c].

Ograniczenia i wyzwania etyczne

Analiza dostępnego piśmiennictwa wskazuje na kilka powtarzających się ograniczeń, niezależnie od konkretnego obszaru zastosowania sztucznej inteligencji w medycynie estetycznej. Po pierwsze, jakość dowodów naukowych pozostaje niska do umiarkowanej, co wynika z małej liczebności prób, heterogeniczności projektów badawczych oraz braku ujednoliconych metod pomiaru wyników [Aguglia i in., 2026; Colceriu i in., 2026; Gucuk

i in., 2026]. Po drugie, zbiory danych wykorzystywane do trenowania algorytmów charakteryzują się ograniczoną różnorodnością demograficzną i geograficzną, co osłabia zdolność generalizacji wyników na populacje niereprezentowane w danych treningowych [Aguglia i in., 2026; Haykal i in., 2025b]. Po trzecie, pomimo rosnącej liczby dostępnych platform wykorzystujących sztuczną inteligencję w konsultacjach estetycznych, żadna z nich nie uzyskała formalnej rejestracji jako wyrób medyczny przez agencje regulacyjne takie jak amerykańska Food and Drug Administration, a większość systemów jest oferowana jako narzędzia konsultacyjne lub wizualizacyjne, nie zaś jako urządzenia wspierające decyzje kliniczne [Aguglia i in., 2026]. Pojawiające się ramy regulacyjne, w tym uniijny Artificial Intelligence Act, kładą nacisk na przejrzystość, identyfikowalność oraz zachowanie nadzoru ze strony człowieka [Aguglia i in., 2026].

Istotnym wyzwaniem pozostają również kwestie etyczne związane z prywatnością danych, ponieważ zastosowania sztucznej inteligencji w chirurgii twarzy wymagają przetwarzania dużych ilości obrazów zawierających możliwe do zidentyfikowania dane biometryczne, które nierzadko wykraczają zakresem poza sam obraz wizualny [Li i in., 2026]. W dyskusji nad odpowiedzialnością prawną za decyzje wspomagane sztuczną inteligencją formułowane są różne stanowiska, od twierdzenia, że obecne systemy sztucznej inteligencji nie mogą ponosić odpowiedzialności prawnej ze względu na swoje ograniczenia techniczne, po propozycje stopniowanego podziału odpowiedzialności, uwzględniającego stopień autonomii algorytmu oraz poziom nadzoru lekarskiego [Li i in., 2026].

4. Wnioski

Sztuczna inteligencja w coraz większym stopniu przenika wszystkie obszary medycyny estetycznej, od obiektywizacji oceny wyglądu twarzy i standaryzacji konsultacji pacjenta, przez dermatologię estetyczną i chirurgię twarzy, po zabiegi niechirurgiczne oraz nowy kierunek badań, jakim jest kosmetogenomika. Wspólnym mianownikiem omówionych zastosowań jest dążenie do zwiększenia obiektywności oceny, personalizacji leczenia oraz poprawy komunikacji z pacjentem, w tym zapobiegania nadmiernej korekcji efektów zabiegów. Wskaźniki takie jak Facial Aesthetic Index, Facial Youth Index oraz Skin Quality Index, uwzględniające płeć, wiek oraz pochodzenie etniczne pacjenta, stanowią przykład praktycznego wdrożenia tej idei w codziennej praktyce klinicznej.

Mimo obiecujących wyników, obecny stan wiedzy charakteryzuje się szeregiem istotnych ograniczeń. Jakość dowodów naukowych pozostaje w większości analizowanych obszarów niska do umiarkowanej, populacje badane są niedostatecznie zróżnicowane pod względem demograficznym i etnicznym, a kwestie związane z prywatnością danych, stroniczością algorytmów oraz odpowiedzialnością prawną pozostają w dużej mierze nierozwiązane. Dalszy rozwój tej dziedziny wymaga standaryzacji metod oceny wyników leczenia, budowy zróżnicowanych i reprezentatywnych zbiorów danych treningowych, a także ścisłej współpracy interdyscyplinarnej łączącej lekarzy różnych specjalności z twórcami technologii, przy jednoczesnym wypracowaniu spójnych ram regulacyjnych zapewniających bezpieczeństwo i skuteczność wdrażanych rozwiązań.

Bibliografia:

1. Aguglia, Raffaele, Tobias Niederegger, Yannick Sprunger, et al. 2026. „Technological Integration in Aesthetic Practice: A Systematic Review of Artificial Intelligence, Augmented Reality and Robotics in Cosmetic Procedures”. *Aesthetic Plastic Surgery* 50 (13): 5643–64. <https://doi.org/10.1007/s00266-026-05898-w>.
2. Al-Dhubaibi, Mohammed Saleh, Ghada Farouk Mohammed, Lina Mohammed Atef, Saleh Salem Bahaj, Ahmed Mohammed Al-Dhubaibi, i Ahmad Mohammed Bukhari. 2025. „Artificial Intelligence in Aesthetic Medicine: Applications, Challenges, and Future Directions”. *Journal of Cosmetic Dermatology* 24 (6): e70241. <https://doi.org/10.1111/jocd.70241>.
3. Chen, Xiang, Zhaokang Zhou, Hui Ding, Huiying Zheng, i Yiping Ge. 2025. „Transforming Aesthetic Dermatology: The Role of Artificial Intelligence in Skin Health”. *Dermatology and Therapy* 15 (8): 1999–2013. <https://doi.org/10.1007/s13555-025-01459-2>.
4. Colceriu, Aurelia-Alexandra, Petru-Iulian Ifteni, Liliana Rogozea, Florin-Gabriel Leășu, i David Stuckler. 2026. „The Impact of Artificial Intelligence on Facial Aesthetic Surgery: A Systematic Review”. *Aesthetic Surgery Journal. Open Forum* 8 (czerwca): oja114. <https://doi.org/10.1093/asjof/oja114>.
5. Eapen, Bell R. 2020. „Artificial Intelligence in Dermatology: A Practical Introduction to a Paradigm Shift”. *Indian Dermatology Online Journal* 11 (6): 881–89. https://doi.org/10.4103/idoj.IDOJ_388_20.
6. Frank, Konstantin, Doris Day, Julius Few, et al. 2024. „AI assistance in aesthetic medicine—A consensus on objective medical standards”. *Journal of Cosmetic Dermatology* 23 (12): 4110–15. <https://doi.org/10.1111/jocd.16481>.
7. Gucuk, Dilan, Leonard Knoedler, Tobias Niederegger, et al. 2026. „Shaping the Future of Nasal Surgery: A Systematic Review of Preservation Rhinoplasty”. *Aesthetic Plastic Surgery* 50 (13): 4962–78. <https://doi.org/10.1007/s00266-026-05853-9>.
8. Haykal, Diala, Hugues Cartier, Kyuho Yi, i Ximena Wortsman. 2025a. „The Transformative Potential of AI in Ultrasound for Facial Aesthetics”. *Journal of Cosmetic Dermatology* 24 (2): e16691. <https://doi.org/10.1111/jocd.16691>.
9. Haykal, Diala, Frédéric Flament, David Amar, et al. 2025b. „Cosmetogenomics unveiled: a systematic review of AI, genomics, and the future of personalized skincare”. *Frontiers in Artificial Intelligence* 8: 1660356. <https://doi.org/10.3389/frai.2025.1660356>.
10. Haykal, Diala, Frederic Flament, Mukta Shadev, et al. 2025c. „Advances in Longevity: The Intersection of Regenerative Medicine and Cosmetic Dermatology”. *Journal of Cosmetic Dermatology* 24 (7): e70356. <https://doi.org/10.1111/jocd.70356>.
11. Li, Jiancheng, Youyou Li, Jianquan Yan, Lijun Yan, i Qin Li. 2026. „Artificial Intelligence in Non-Surgical Cosmetic Procedures: A Multi-Stakeholder Revolution”. *Aesthetic Plastic Surgery* 50 (11): 4413–30. <https://doi.org/10.1007/s00266-026-05689-3>.
12. Liao, Ting, Rui Luo, Ying Deng, Hongqiu Yang, i Yu Du. 2026. „Targeting Melasma: Innovations in Pigment Deposition and Photoaging in Cosmetic Dermatology”. *Journal of Cosmetic Dermatology* 25 (1): e70665. <https://doi.org/10.1111/jocd.70665>.
14. Pooth, Rainer, Sonja Sattler, Frederic Westerberg, Tatjana Pavicic, i Martina Kerscher. 2025. „Transforming Skin Quality Evaluation With AI: From Subjective Grading to

- Data-Driven Precision”. *Journal of Cosmetic Dermatology* 24 (Suppl 4): e70371. <https://doi.org/10.1111/jocd.70371>.
15. Thunga, Sukruthi, Marius Khan, Soo Ick Cho, Jung Im Na, i Jane Yoo. 2025. „AI in Aesthetic/Cosmetic Dermatology: Current and Future”. *Journal of Cosmetic Dermatology* 24 (1): e16640. <https://doi.org/10.1111/jocd.16640>.
 16. Xie, Yi, Ishith Seth, David J. Hunter-Smith, Warren M. Rozen, Richard Ross, i Matthew Lee. 2023. „Aesthetic Surgery Advice and Counseling from Artificial Intelligence: A Rhinoplasty Consultation with ChatGPT”. *Aesthetic Plastic Surgery* 47 (5): 1985–93. <https://doi.org/10.1007/s00266-023-03338-7>.
 17. Xu, Qiannan, Chuanlong Jia, Xin Xia, Nan Xu, i Juntian Liu. 2026. „Artificial Intelligence in Botulinum Toxin Injections: A Mini-Review of Current Applications, Challenges, and Translational Perspectives”. *Cureus* 18 (5): e108898. <https://doi.org/10.7759/cureus.108898>.
 18. Eldaly, Abdullah S., Francisco R. Avila, Ricardo A. Torres-Guzman, et al. 2022. „Simulation and Artificial Intelligence in Rhinoplasty: A Systematic Review”. *Aesthetic Plastic Surgery* 46 (5): 2368–77. <https://doi.org/10.1007/s00266-022-02883-x>.

3. TRÓJASPEKTOWA OCENA KLINICZNA SKUTECZNOŚCI AMINOFLUORKÓW W ZNOSZENIU NADWRAŻLIWOŚCI ZĘBINY O RÓŻNEJ ETIOLOGII. SERIA TRZECH PRZYPADKÓW KLINICZNYCH

Oliwia Szurek, Jakub Zwolski, Zuzanna Białas

Uniwersytet Jagielloński Collegium Medicum Wydział lekarski

Studenckie Koło Naukowe Stomatologii Zachowawczej z Endodoncją

ul. Boksycka 155B, 27-415 Kunów

E-mail: oliwiaszurek@wp.pl

1. Wstęp i cele pracy

Nadwrażliwość zębiny dotyka, według danych piśmiennictwa, od 3% do 57% populacji dorosłych [Splieth, Tachou (2012)]. Objawia się ona jako ostry, krótki ból powstający w odpowiedzi na nieszkodliwe bodźce (termiczne, dotykowe, osmotyczne lub chemiczne).

Najbardziej powszechnym i akceptowanym wyjaśnieniem tego zjawiska jest teoria hydrodynamiczna Brännströma. Według jej założeń, czynniki zewnętrzne (np. podmuch zimnego powietrza, kwaśne potrawy lub cukry) powodują ruch płynu wypełniającego kanaliki zębinowe. Ten przepływ stymuluje mechanoreceptory zlokalizowane na obwodzie miazgi zęba oraz w przykomorowej warstwie zębiny. Intensywność odczuwanego bólu jest wprost proporcjonalna do liczby oraz stopnia drożności kanalików zębinowych [Brännström, Aström (1972)].

Kluczem do natychmiastowego wygaszenia tej reakcji jest mechaniczne zablokowanie ujść kanalików, co hamuje ruch płynu [Brännström, Aström (1972)]. W przypadku nadwrażliwości wywołanej zabiegami jatrogennymi, kwasami lub przeciążeniami mechanicznymi, poszukuje się preparatów o natychmiastowym i długotrwałym działaniu. Niniejsza praca ma na celu ocenę kliniczną zastosowania skoncentrowanego żelu zawierającego aminofluorki (**Olaflur, Dectaflur i fluorek sodu**) - łączna zawartość fluoru (12,5 mg/g 12500 ppm F⁻) w serii trzech przypadków klinicznych reprezentujących odmienne mechanizmy powstawania nadwrażliwości.

2. Opis przypadków klinicznych

Pacjent 1: Nadwrażliwość po profesjonalnym wybielaniu gabinetowym (etiologia jatrogenna)

Pacjentka (lat 22) zgłosiła się z problemem uogólnionej nadwrażliwości zębów, która pojawiła się po zabiegu profesjonalnego wybielania z użyciem 16% nadtlenku wodoru. Mechanizm ten tłumaczy się przenikaniem wolnych rodników tlenowych do zębiny, co powoduje przejściowy stan zapalny miazgi oraz odwodnienie tkanek zęba [Chen, Huang (2021)]. Pacjentka była obserwowana przez 30 dni zgodnie z planem wizyt.



Rycina 1. Wybielanie przed (kolor A3) oraz wybielanie po (kolor A1)

Pacjent 2: Bruksizm i erozja (etiologia mechaniczno-chemiczna)

Pacjent (lat 25) zgłosił się z bólem okolicy zębów bocznych podczas spożywania kwaśnych napojów czy szczotkowaniu zębów. W badaniu wewnątrzustnym stwierdzono obecność patologicznego starcia zębów (atrycja) powstałych na skutek ekscentrycznych sił zgryzowych, powstających podczas zgrzytania zębów nocą. Starcie współistniało z gładkimi, miseczkowatymi ubytkami o charakterze erozji kwasowej (dieta bogata w kwaśne napoje gazowane). Starcie zębów bocznych oceniono w klasyfikacji TWI (ang. Tooth Wear Index) na stopień 3 (utrata szkliwa i zębiny przekraczająca 1/3 powierzchni) [Smith, Knight (1984)]. Pacjent również był obserwowany na bieżąco przez 30 dni. Zaplanowano odbudowę ubytków materiałem złożonym.



Rycina 2. Skany wewnątrzustne (modele 3D) obrazujące lokalizację ubytków erozyjnych

Pacjent 3: Próchnica początkowa powierzchni stycznych (etiologia bakteryjna - model retrospektywny długoterminowy od listopada)

Pacjent (lat 23) zgłosił się do gabinetu w listopadzie 2025 z powodu wrażliwości na bodźce słodkie i termiczne w rejonie zębów przedtrzonowych i trzonowych po stronie lewej. Badanie kliniczne oraz radiologiczne (RTG skrzydłowo-zgryzowe) ujawniło obecność początkowych zmian próchnicowych na powierzchniach stycznych w zębach 24, 25, 26, 27, 44, 45. Z uwagi na wczesny etap zmian (z wyjątkiem zęba 25 w którym usunięto próchnicę i odbudowano materiałem kompozytowym), podjęto decyzję o wdrożeniu postępowania nieinwazyjnego opartego na aplikacji aminofluorków w przestrzenie międzyzębowe i regularnej kontroli radiologicznej realizowanej konsekwentnie co 3 miesiące (od listopada do maja).



Rycina 3. Sekwencja zdjęć radiologicznych (RTG skrzydłowo – zgryzowe lub celowane)

Pacjenta 3: Listopad (T0), Luty (po 3 miesiącach), Maj (po 6 miesiącach). Udokumentowanie procesu zatrzymania demineralizacji i delikatnej remineralizacji (wzrostu wysycenia cienia mineralnego) struktur tkanek twardych na powierzchniach stycznych.

3. Metodologia badania i protokół standaryzacji

W celu oceny subiektywnej oraz obiektywnej. odczuć bólowych zastosowano dwa niezależne testy diagnostyczne:

1. **Cold Air Blast Test (Subiektywna skala VAS 0-10):** stymulacja standaryzowanym podmuchem powietrza z dmuchawy strzykawko-wodnej przez czas 1 sekundy, z odległości 1 cm pod kątem prostym do powierzchni zęba. Pacjent zaznaczał poziom bólu na osi od 0 (brak bólu) do 10 (ból nie do zniesienia).
2. **Skala Schiffa (Obiektywna ocena badającego):** ocena odpowiedzi behawioralnej pacjenta na bodziec powietrzny w skali: 0 (brak reakcji), 1 (skrzywienie się/reakcja mimiczna), 2 (cofnięcie głowy), 3 (gwałtowne cofnięcie głowy i prośba o przerwanie testu).

W celu wyeliminowania wpływu innych substancji czynnych na wynik badania, wdrożono standaryzację higieniczną. Wszyscy pacjenci na 7 dni przed rozpoczęciem pomiarów oraz przez cały czas trwania obserwacji postępowali według wcześniejszych nawyków higienicznych i dietetycznych. Zapewniło to stałe, neutralne tło i pozwoliło traktować każdego pacjenta jako własną grupę kontrolną w czasie.

Protokół stosowania żelu z aminofluorkami (12500 ppm F⁻):

Z uwagi na specyfikę przypadków oraz różny czas prowadzenia obserwacji, protokół aplikacji był zróżnicowany- dostosowany do etiologii nadwrażliwości:

Pacjent 1 i 2: Po gabinetowej aplikacji żelu z aminofluorkami (3 minuty, dzień 0), pacjenci stosowali preparat w domu raz w tygodniu wieczorem. Po 2 minutach szczotkowania zębów żel był wypływany, bez płukania jamy ustnej wodą. U Pacjenta 2 żel aplikowano bezpośrednio do szyny relaksacyjnej. Pomiar VAS/Schiff realizowano w dniach: 0 (przed/po) oraz po 7 i 30 dniach **Pacjent 3:** Oprócz codziennego szczotkowania, u pacjenta wdrożono aplikację żelu w przestrzenie międzyzębowe [Jørgensen, Shariati (1989)]. Pacjent otrzymał polecenie wprowadzania żelu ze związkami fluoru za pomocą nici dentystycznej nasączonej preparatem (raz w tygodniu przed snem, po uprzednim oczyszczeniu przestrzeni nicią suchą). Kontrola nadwrażliwości (VAS/Schiff) oraz ocena radiologiczna (RTG) odbywały się co 3 miesiące (Listopad, Luty, Maj).

4. Wyniki badań i analiza skuteczności procentowej

W celu zobrazowania efektywności preparatu wprowadzono wskaźnik Procentowej Redukcji Bólu (PRB) dla skali VAS, obliczany według wzoru [Stewardson, Crisp, McHugh (2004)]:

$$PRB = ((VAS_{T0} - VAS_{TX}) / VAS_{T0}) \times 100\%$$

Tabela 1. Zbiornicze zestawienie stopnia nasilenia nadwrażliwości zębiny w skali VAS i skali Schiffa oraz Procentowej Redukcji Bólu u trzech badanych pacjentów w poszczególnych punktach kontrolnych

Pacjent/Etiologia	Skala/Wskaźnik	T0(Wyjściowy)	T1(Natychmiastowy /Po 1. aplikacji)	T2(Po 7 dniach/ u Pacjenta 3: po 3 mies.)	T3(Po 1 mies./ u Pacjenta 3: po 6 mies.)
Pacjent 1 (Wybielanie) Obserwacja bieżąca (30dni)	Skala VAS (0-10) Redukcja VAS (%)	8 Baseline	3 62,5%	1 87,5%	0 100,0%
	Skala Schiffa (0-3)	3	1	0	0
Pacjent 2 (Bruksizm) Obserwacja bieżąca (30dni)	Skala VAS (0-10) Redukcja VAS (%)	7 Baseline	4 42,9%	2 71,4%	1 85,7%
	Skala Schiffa (0-3)	2	1	1	0
Pacjent 3 (Próchnica) Obserwacja od listopada (6mies.)	Skala VAS (0-10) Redukcja VAS (%)	6 Baseline	3 50,0% (Dzień 1)	1 83,3% (Luty)	0 100,0% (Maj)
	Skala Schiffa (0-3)	2	1 (Dzień 0)	0 (Luty)	0 (Maj)

Wskaźnik wykorzystano wyłącznie jako narzędzie opisowe.

5. Dyskusja i wnioski

Należy podkreślić, że przez cały okres obserwacji pacjenci nie zmienili nawyków dietetycznych i higienicznych, więc istnieje wysokie prawdopodobieństwo, że obserwowany efekt spadku dolegliwości bólowych związany był z zastosowaniem żelu z aminofluorkami (Olaflur i Dectaflur).

Zgodnie z teorią hydrodynamiczną Brännströma, kluczem do natychmiastowego efektu (T1) była mechaniczna blokada drożności kanalików zębinowych. Reakcja z jonami wapnia owocuje obfitym wytrąceniem kryształów fluorku wapnia (CaF₂), które blokują otwarte ujścia kanalików zębinowych, uniemożliwiając ruch płynu pod wpływem

bodźca termicznego. Przełożyło się to na redukcję bólu w skali VAS o średnio 51,8% już po pierwszej aplikacji gabinetowej.

Szczególnie interesujące obserwacje płyną z analizy przypadku Pacjenta 3 (obserwacja od listopada). Wprowadzanie preparatu z wysokim stężeniem fluoru bezpośrednio na nici dentystycznej w przestrzenie międzyzębowe stworzyło specyficzne warunki mikrośrodowiskowe. Co kluczowe z punktu widzenia fizykochemii, aminofluorki wykazują zwiększoną efektywność w środowisku kwaśnym – spadek pH stymuluje i przyspiesza wytrącanie się fluorku wapnia. Środowisko indukowane przez bakterie kariogenne w niszach stycznych mogło sprzyjać remineralizacji. Długofalowy rezerwuuar wysoce skoncentrowanego fluoru (12500 ppm F) doprowadził nie tylko do całkowitego wygaszenia nadwrażliwości (PRB=100% w maju), ale przede wszystkim do delikatnej remineralizacji struktur zębiny, co zostało zaobserwowane w badaniach RTG (w lutym i maju) jako wzrost wysycenia cienia tkanki i pełna stabilizacja wczesnego ubytku próchnicowego bez konieczności inwazyjnego leczenia. Przedstawione przypadki wskazują na potencjalnie szerokie zastosowania aminofluorków u pacjentów z nadwrażliwością zębiny o różnej etiologii. Uzyskane wyniki sugerują możliwość zastosowania preparatu zarówno w przypadku nadwrażliwości po zabiegach wybielania, ubytków niepróchnicowego pochodzenia, jak i w początkowych stadiach próchnicy. Świadczy to o wielokierunkowym i kompleksowym działaniu preparatu bogatego w aminofluorki.

Wszyscy pacjenci wyrazili świadomą zgodę na wykorzystywanie zanonimizowanych danych klinicznych oraz materiału fotograficznego do celów naukowych i dydaktycznych.

Bibliografia:

1. M. Brännström, A. Åström (1972), *The hydrodynamics of the dentine; its possible relationship to dentinal pain*
2. Chang Chen, Xiansheng Huang (2021), *H₂O₂ gel bleaching induces cytotoxicity and pain conduction in dental pulp stem cells via intracellular reactive oxygen species on enamel/dentin disc*
3. J. Jørgensen, M. Shariati (1989), *Fluoride uptake into demineralized primary enamel from fluoride-impregnated dental floss in vitro*
4. B. G. N. Smith, J. K. Knight (1984), *An index for measuring the wear of teeth*
5. Christian H. Splieth, Aikaterini Tachou (2012), *Epidemiology of dentin hypersensitivity*
6. Dominic A. Stewardson, Russell J. Crisp, Siobhan McHugh (2004), *The Effectiveness of Systemp.desensitizer in the treatment of dentine hypersensitivity*

4. CYBERKNIFE JAKO APARAT DO RADIOTERAPII STEREOTAKTYCZNEJ RAKA WĄTROBY – WADY I ZALETY

mgr Karolina Kulej

Uniwersytet Jagielloński

Collegium Medicum

Wydział Nauk o Zdrowiu

E-mail: kulejkarolina2390@gmail.com

1. Wstęp

Nowotwory należą do najpoważniejszych wyzwań współczesnej medycyny i pozostają jedną z głównych przyczyn zgonów na świecie. Według danych Krajowego Rejestru Nowotworów, w 2022 roku nowotwory złośliwe zajmowały drugie miejsce wśród przyczyn zgonów w Polsce. Starzenie się społeczeństwa oraz coraz większa ekspozycja na czynniki ryzyka powodują wzrost liczby zachorowań, w tym na nowotwory wątroby. Najczęściej występującym pierwotnym nowotworem tego narządu jest rak wątrobowokomórkowy (HCC), którego częstość wzrasta wraz z wiekiem. Znacznie częściej niż nowotwory pierwotne rozpoznawane są wtórne nowotwory wątroby, będące przerzutami nowotworów złośliwych innych narządów [1,2,3].

W większości przypadków rak wątrobowokomórkowy rozwija się na podłożu marskości wątroby. Do najważniejszych czynników ryzyka należą przewlekłe spożywanie alkoholu, niealkoholowa stłuszczeniowa choroba wątroby związana z otyłością i cukrzycą typu 2 oraz przewlekłe wirusowe zapalenie wątroby. Ze względu na mało charakterystyczne objawy we wczesnym stadium choroba jest często rozpoznawana późno, co ogranicza możliwość leczenia radykalnego. Podstawę diagnostyki stanowią badania obrazowe oraz oznaczenie stężenia alfa-fetoproteiny (AFP), natomiast leczenie obejmuje metody chirurgiczne, ablacyjne, chemoembolizację i radioterapię [4,5].

Postęp technologiczny przyczynił się do rozwoju nowoczesnych metod radioterapii stosowanych u pacjentów z nowotworami wątroby, zwłaszcza tych, którzy nie kwalifikują się do leczenia operacyjnego. Radioterapia stereotaktyczna umożliwia podanie wysokiej dawki promieniowania w niewielkiej liczbie frakcji z jednoczesnym maksymalnym ograniczeniem dawki pochłanianej przez otaczające zdrowe tkanki. Skuteczność tej metody zależy od precyzyjnej lokalizacji guza oraz uwzględnienia jego ruchomości związanej z oddychaniem [6].

Jednym z najbardziej zaawansowanych systemów wykorzystywanych w radioterapii stereotaktycznej jest aparat CyberKnife. Dzięki połączeniu robota z akceleratorem liniowym, systemem obrazowania i technologią śledzenia ruchów oddechowych umożliwia precyzyjne napromienianie guzów zlokalizowanych także w narządach poruszających się podczas oddychania, takich jak wątroba. Stanowi cenną alternatywę dla chorych z guzami nieoperacyjnymi lub trudnymi do leczenia chirurgicznego [7].

Pomimo rosnącego zainteresowania systemu CyberKnife w terapii nowotworów wątroby nadal istnieje potrzeba oceny jego skuteczności oraz możliwości zastosowania w warunkach polskiej praktyki klinicznej. Na szczególną uwagę zasługują jego zalety, takie jak wysoka precyzja, niewielka inwazyjność i krótki czas leczenia, przy jednoczesnym uwzględnieniu ograniczeń związanych z kosztami i dostępnością tej technologii.

2. Rak wątroby – charakterystyka kliniczna

Rak wątrobowokomórkowy (HCC) jest najczęściej występującym pierwotnym nowotworem złośliwym wątroby i w większości przypadków rozwija się na podłożu marskości tego narządu. Zachorowalność wzrasta wraz z wiekiem, częściej dotyczy mężczyzn i osiąga największe wartości około 70. roku życia. Mimo że w Polsce HCC występuje rzadziej niż nowotwory płuca czy jelita grubego, liczba zachorowań stopniowo wzrasta [1,2,4].

Do najważniejszych czynników ryzyka należą przede wszystkim przewlekłe zakażenia wirusami HBV i HCV, marskość wątroby związana z otyłością i cukrzycą typu 2. Znaczenie mają również wybrane choroby metaboliczne, takie jak hemochromatoza, a także czynniki środowiskowe, m.in. ekspozycja na aflatoksyny. Rozwój HCC jest wynikiem współdziałania czynników genetycznych, środowiskowych i przewlekłego procesu zapalnego prowadzącego do włóknienia oraz uszkodzenia miększu wątroby [1,2,4].

Rozpoznanie raka wątrobowokomórkowego (HCC) opiera się głównie na badaniach obrazowych oraz oznaczeniu stężenia alfa-fetoproteiny (AFP), a w większości przypadków nie wymaga wykonania biopsji. Podstawową metodą diagnostyki HCC jest ultrasonografia (USG), szczególnie u pacjentów z grup ryzyka. Natomiast największą wartość diagnostyczną mają tomografia komputerowa (TK) i rezonans magnetyczny (MRI), które umożliwiają dokładną ocenę zmian ogniskowych i stopnia zaawansowania choroby. Pozytonowa tomografia emisyjna (PET) znajduje zastosowanie głównie w ocenie przerzutów i zaawansowania nowotworu. Ma natomiast ograniczoną wartość w diagnostyce pierwotnego raka wątrobowokomórkowego [2].

Sposób leczenia jest zależny od stopnia zaawansowania nowotworu oraz wydolności wątroby. U wybranych chorych najlepsze wyniki przynoszą resekcja chirurgiczna i przeszczepienie wątroby. Alternatywę stanowi ablacja chemoembolizacyjna (TACE), która jest stosowana przede wszystkim u pacjentów niekwalifikujących się do leczenia operacyjnego. W ostatnich latach wzrosło znaczenie radioterapii, szczególnie radioterapii stereotaktycznej (SBRT). Dzięki wysokiej precyzji SBRT stanowi skuteczną metodę leczenia pacjentów z nieresekcyjnym HCC, zwłaszcza przy niewielkiej liczbie zmian. Wybór odpowiedniej metody leczenia powinien być podejmowany z uwzględnieniem lokalizacji guza, stopnia zaawansowania choroby oraz funkcji wątroby [6,8].

3. Radioterapia stereotaktyczna

Radioterapia jest jedną z najszybciej rozwijających się metod leczenia nowotworów. Jej rozwój rozpoczął się po odkryciu promieniowania rentgenowskiego przez Wilhelma Roentgena oraz promieniotwórczości przez Marię Skłodowską-Curie. Kolejne lata przyniosły rozwój teleradioterapii, akceleratorów liniowych oraz nowoczesnych technik napromieniania.

Początek XXI wieku to okres dynamicznego rozwoju radioterapii stereotaktycznej (SBRT), która obecnie znajduje szerokie zastosowanie w praktyce klinicznej [9].

Radioterapia stereotaktyczna (SBRT) polega na podaniu wysokiej dawki promieniowania w niewielkiej liczbie frakcji z bardzo dużą dokładnością. Metoda ta przeznaczona jest głównie do leczenia niewielkich zmian nowotworowych i pozwala na maksymalną ochronę otaczających zdrowych tkanek. Skuteczność terapii zależy od precyzyjnego unieruchomienia pacjenta, dokładnego wyznaczenia objętości napromieniania oraz zastosowania nowoczesnych technik obrazowania i planowania leczenia [10].

Początkowo radioterapia stereotaktyczna była realizowana w wykorzystaniem aparatu Gamma Knife, przeznaczonego wyłącznie do leczenia zmian wewnątrzczaszkowych. Rozwój akceleratorów liniowych umożliwił leczenie zmian pozaczaszkowych, a przełomem było wprowadzenie systemu CyberKnife. Aparat ten, wyposażony w akcelerator liniowy zamontowany na ramieniu robotycznym, pozwala na bardzo precyzyjne napromienianie guzów zlokalizowanych w różnych częściach ciała. Do głównych zalet SBRT należą nieinwazyjność, wysoka precyzja oraz możliwość podania wysokiej dawki promieniowania przy jednoczesnym ograniczeniu napromieniania narządów krytycznych. Szczególne znaczenie ma również kontrola ruchomości guza związanej z oddychaniem. W tym celu stosuje się techniki wstrzymywania oddechu, ucisku brzucha, bramkowania oddechowego oraz systemy śledzenia ruchu guza [11,12].

W odróżnieniu od radioterapii konwencjonalnej SBRT wykorzystuje hipofrakcjonowanie, czyli podawanie wysokich dawek promieniowania w 3-5 frakcjach. Takie postępowanie zwiększa skuteczność leczenia i skraca czas terapii, jednak wymaga bardzo dokładnego pozycjonowania pacjenta. Techniki monitorowania położenia guza podczas napromieniania, co znacząco zwiększa bezpieczeństwo i precyzję leczenia [10].

4. CyberKnife – aparat do radioterapii stereotaktycznej

System CyberKnife został opracowany w latach 90. przez Johna Adlera z Uniwersytetu Stanforda. W ciągu ostatnich dekad technologia ta była systematycznie rozwijana i obecnie wykorzystywana jest w leczeniu nowotworów oraz wybranych zmian nienowotworowych w różnych lokalizacjach, m.in. w mózgu, płucach, wątrobie, kręgosłupie i prostaty. Na świecie działa ponad 350 aparatów CyberKnife, natomiast w Polsce znajduje się pięć takich systemów. CyberKnife stanowi nieinwazyjną metodę leczenia pacjentów z guzami nieoperacyjnymi lub trudnymi do usunięcia chirurgicznego [15,16].

Celem systemu jest precyzyjne dostarczenie dawki promieniowania do zmiany przy jednoczesnym maksymalnym ograniczeniu napromieniania zdrowych tkanek. Aparat wykorzystuje akcelerator liniowy generujący promieniowanie X o energii 6 MV, zamontowany na ramieniu robotycznym o sześciu stopniach swobody. W skład systemu wchodzi również ortogonalny system obrazowania RTG oraz zrobotyzowany stół RoboCouch, umożliwiający automatyczną korektę ułożenia pacjenta podczas leczenia. Aparat CyberKnife umożliwia napromienianie z wielu kierunków z submilimetrową dokładnością. Kształt wiązki promieniowania formowany jest za pomocą kolimatorów: Fixed, IRIS i wielolistkowego MLC, co pozwala na leczenie zarówno małych, jak i większych zmian o nieregularnym kształcie. Zastosowanie kolimatora MLC dodatkowo skraca czas terapii. System obrazowania wykorzystuje dwie lampy rentgenowskie oraz dwa detektory, które

porównują obrazy wykonane podczas leczenia z obrazami referencyjnymi z planu terapeutycznego. Dzięki temu możliwa jest ciągła kontrola położenia pacjenta i automatyczna korekta ustawienia robota oraz stołu terapeutycznego, zapewniająca wysoką dokładność napromieniania [7].

Istotnym elementem aparatu CyberKnife jest system Synchrony, który umożliwia śledzenie ruchu guza w czasie rzeczywistym. W przeciwieństwie do technik wymagających wstrzymywania oddechu lub brankowania, Synchrony synchronizuje ruch wiązki promieniowania z naturalnym oddechem pacjenta. Model ruchu tworzony jest na podstawie obrazów RTG oraz zewnętrznym markerów oddechowych i jest na bieżąco aktualizowany przez cały czas leczenia. Pozwala to zmniejszyć marginesy bezpieczeństwa, lepiej chronić zdrowe tkanki oraz zwiększyć precyzję terapii zmian ruchomych, szczególnie zlokalizowanych w wątrobie i płucach. W przypadku zmian zlokalizowanych w narządach miękkich, takich jak wątroba, stosuje się wszczepione znaczniki referencyjne, które umożliwiają precyzyjne śledzenie położenia zmiany podczas całego cyklu oddechowego [7,17].

Aparat CyberKnife stanowi skuteczną alternatywę dla pacjentów niekwalifikujących się do leczenia chirurgicznego oraz może być stosowany jako terapia pomostowa przed przeszczepieniem wątroby. U wielu chorych leczenie operacyjne nie jest możliwe z powodu rozległości guza, jego lokalizacji lub współistniejącej marskości wątroby. W takich przypadkach aparat CyberKnife zapewnia wysoką miejscową kontrolę nowotworu przy niewielkim ryzyku ciężkich powikłań. W leczeniu zmian wątrobowych wykorzystuje się system Synchrony oraz wszczepione znaczniki referencyjne, które umożliwiają śledzenie ruchu guza podczas całego cyklu oddechowego. Standardowo leczenie realizowane jest w 3-5 frakcjach. Leczenie z wykorzystaniem aparatu CyberKnife jest na ogół dobrze tolerowane. Najczęściej obserwowane działania niepożądane obejmują przejściowe zmęczenie, nudności, ból okolicy wątroby oraz powikłania związane z implantacją znaczników. Dzięki precyzyjnemu śledzeniu ruchu guza możliwe jest ograniczenie dawki dla zdrowych tkanek, zachowanie funkcji wątroby oraz uzyskanie wysokiej skuteczności miejscowej terapii [13,14,18].

Do najważniejszych zalet systemu CyberKnife należą: submilimetrową precyzja napromieniania, nieinwazyjny charakter leczenia, krótki czas terapii (3-5 frakcji), dobra tolerancja oraz możliwość śledzenia ruchu guza w czasie rzeczywistym dzięki systemowi Synchrony. Do ograniczeń aparatu CyberKnife zalicza się przede wszystkim: kwalifikacje pacjentów z niewielkimi zmianami nowotworowymi, ograniczoną dostępność aparatury i wysokie koszty leczenia. Wadami są również opóźniony efekt terapeutyczny oraz konieczność implantacji znaczników, która wiąże się z ryzykiem miejscowych powikłań [13,14].

5. Materiał i metody badań

Badaniem objęto 6 pacjentów z pierwotnym lub wtórnym rakiem wątroby, leczonych metodą radioterapii stereotaktycznej w wykorzystaniu aparatu CyberKnife. Do analizy włączono wszystkich pacjentów spełniających kryteria kwalifikacji. Grupę stanowili 3 mężczyźni i 3 kobiety w wieku od 67 do 78 lat. U jednego pacjenta rozpoznano pierwotny nowotwór wątroby (rak wewnątrzwątrobowych dróg żółciowych), natomiast u pozostałych

stwierdzono przerzuty do wątroby pochodzące z raka jajnika, raka nerki oraz nowotworów jelita grubego i odbytnicy. Analizę przeprowadzono anonimowo na podstawie dokumentacji medycznej pacjentów. Wszyscy chorzy byli leczeni z wykorzystaniem aparatu CyberKnife oraz systemu Synchrony, który umożliwia śledzenie ruchów guza w czasie rzeczywistym. Na klatce piersiowej pacjentów umieszczano diody LED, na podstawie których tworzone model oddechowy wykorzystywany do synchronizacji napromieniania z ruchami oddechowymi. Całkowita dawka promieniowania wynosiła od 40 do 50 Gy i była podana w pięciu frakcjach po 8-10 Gy. Zastosowano różne kolimatory: 5-krotnie – MLC i 2-krotnie – IRIS. Czas napromieniania wahał się od 25 do 40 minut i wynosił średnio 31,86 minut. Jeden z pacjentów miał dwukrotnie przeprowadzone leczenie stereotaktyczne dwóch odrębnych przerzutów. Leczenie realizowane było co drugi dzień roboczy. U wszystkich pacjentów leczenie było dobrze tolerowane i nie odnotowano klinicznie istotnych ostrych odczynów popromiennych.

6. Wyniki (Analiza dawek w narządach krytycznych)

Na podstawie światowych wytycznych dotyczących planowania leczenia opracowano wielkości dawek granicznych w narządach krytycznych. Brano pod uwagę m.in. protokoły QUANTEC oraz Timmerman. Fragment dotyczący 5-frakcyjnej radioterapii stereotaktycznej nowotworów wątroby przedstawiono w poniższej tabeli (Tabela I).

Tabela 1. Dopuszczalne dawki graniczne na narządy krytyczne dla 5-frakcyjnej radioterapii stereotaktycznej

Narząd krytyczny	Dawka objętościowa (Gy)	Maksymalna dawka punktowa (Gy)
Kanał kręgowy	-	23
Serce	-	27
Ściana klatki piersiowej	Dla $V = 30 \text{ cm}^3$, $D < 32$	39
Żołądek	Dla $V = 5 \text{ cm}^3$, $D < 25$ Dla $V = 50 \text{ cm}^3$, $D < 12$	-
Jelita	Dla $V = 10 \text{ cm}^3$, $D < 25$	35
Płuca (prawe i lewe)	Dla $V = 10\%$, $D < 20$	-
Nerki (Prawa i lewa)	$D_{\text{sr}} < 10$	-

Źródło: opracowanie własne.

Dawki, jakie otrzymały narządy krytyczne pacjentów 1-6, którzy zostali poddani radioterapii stereotaktycznej przy użyciu aparatu CyberKnife mieszczą się w przyjętych kryteriach tolerancji. Wyjątek stanowiła ściana klatki piersiowej, dla której u trzech pacjentów odnotowano przekroczenie maksymalnej dawki punktowej, co było związane z bliskim położeniem guza względem narządu krytycznego.

Przeanalizowane zostały także dawki średnie i maksymalne dawki punktowe w zdrowej części wątroby, opisane jako liver-PET. Wyniki przedstawiono w poniższej tabeli (Tabela II).

Tabela 2. Zestawienie dawek dla PTV i zdrowej części wątroby (liver-PET)

		Dawka minimalna (Gy)	Dawka średnia (Gy)	Maksymalna dawka punktowa (Gy)
Pacjent 1	PTV	36,17	43,69	49,38
	liver-PTV	-	4,21	42,53
Pacjent 2	PTV	47,24	57,02	62,50
	liver-PTV	-	9,52	53,50
Pacjent 3	PTV	34,34	50,73	57,62
	liver-PTV	-	10,03	50,17
Pacjent 4	PTV	33,90	50,61	56,25
	liver-PTV	-	2,12	49,70
Pacjent 5	PTV	47,70	56,34	63,29
	liver-PTV	-	1,37	59,13
Pacjent 6	PTV	43,61	50,58	57,24
	liver-PTV	-	1,88	48,47
	PTV1	43,03	49,61	54,74
	liver-PTV1	-	6,97	49,82

Źródło: opracowanie własne.

Dawki średnie w analizowanych obszarach nie przekraczają 10,5 Gy, co pozwala na zachowanie funkcji wątroby, a toksyczność w zdrowej części wątroby podczas leczenia na aparacie CyberKnife jest stosunkowo niska.

7. Podsumowanie

Przeprowadzona analiza potwierdziła, że radioterapia stereotaktyczna z wykorzystaniem aparatu CyberKnife jest skuteczną i bezpieczną metodą leczenia wybranych nowotworów wątroby, szczególnie u pacjentów niekwalifikujących się do

leczenia chirurgicznego. Zastosowanie systemu synchrony umożliwia precyzyjne śledzenie ruchów guza podczas oddychania, co pozwala ograniczyć dawkę promieniowania dla zdrowych tkanek i narządów krytycznych. W badanej grupie wszyscy pacjenci dobrze tolerowali leczenie, a wartości dawek dla narządów krytycznych mieściły się w przyjętych normach. Pomimo niewielkiej liczby analizowanych przypadków uzyskane wyniki są zgodne z danymi literaturowymi i wskazują, że aparat CyberKnife stanowi wartościową opcję terapeutyczną w leczeniu zmian nowotworowych wątroby. Konieczne są jednak dalsze badania obejmujące większe grupy pacjentów oraz dłuższy okres obserwacji, aby potwierdzić długoterminową skuteczność i bezpieczeństwo tej metody.

Bibliografia:

1. Krajowy Rejestr Nowotworów. Nowotwory Złośliwe w Polsce w 2022 roku. Warszawa 2024.
2. Krawczyk M. [red.]: Rak wątrobowokomórkowy. Wydawnictwo Lekarskie PZWL. Warszawa 2015; s. 1-73.
3. Potemski P., Polkowski W. [red.]: Nowotwory układu pokarmowego. 2015; s. 173-179
4. Modern Healthcare Institute. Leczenie raka wątrobowokomórkowego. Praktyka. Trudności. Nadzieje. 2021; s. 7-12.
5. Krzakowski M., Zieniewicz K., Habior A., Horban A., Olszewski W., Cianciara J.: Rak wątrobowokomórkowy – rozpoznanie i leczenie. Onkologia w Praktyce Klinicznej. Warszawa 2009; 5(4): 125-140.
6. Gliński B., Mucha-Malecka A., Jakubowicz J., Frączek-Błachut Beata. Rola radioterapii w leczeniu chorych z pierwotnymi i przerzutowymi guzami wątroby. Współczesna Onkologia. 2008;12:272-275.
7. Wocial P. CyberKnife S7 – radioterapia najwyższej precyzji. Inżynier i Fizyk Medyczny. 2021;10(1):10-11.
8. Krawczyk M., Wasilewicz M., Hartleb M., Krzakowski M., Milkiewicz P., Habior A. Rozpoznanie i leczenie raka wątrobowokomórkowego – rekomendacje Sekcji Hepatologicznej Polskiego Towarzystwa Gastroenterologii. Gastroenterologia Kliniczna Postępy i Standardy. 2015; 7(3):65-89.
9. Maciejewski B. Od Roentgena (120 lat) do stereotaktycznej radiochirurgii. Nowotwory. Journal of Oncology. 2015;65(5):373-82.
10. Reinfuss M., Byrski E., Walasek T., Blecharz P. Postęp w technikach radioterapii i jego implikacje kliniczne. Nowotwory. Journal of Oncology. 2011;61(3):211-223.
11. Ślosarek K., Grządziel A., Kopczyńska J., Osewski W., Bekman B. Techniki napromieniania w radioterapii – radiochirurgia. Inżynier i Fizyk Medyczny. 2015;4(4):229-236.
12. Bąk B., Adamska A. Innowacyjne metody wykorzystane w radioterapii. Ogólnopolski przegląd medyczny. 2017;(6):18-22.
13. Winter J., Wong R., Swaminath A., Chow T. Accuracy of robotic radiosurgical liver treatment throughout the respiratory cycle. International Journal of Radiation Oncology*Biology*Physics. 2015;93(4):916-924.

14. Bibault J., Dewas S., Vautravers-Dewas C., Hollebecque A., Jarraya H., Lacornerie T., Mirabel X. Stereotactic body radiation therapy for hepatocellular carcinoma: prognostic factors of local control, overall survival, and toxicity. *PloS one*. 2013;8(10): e77472.

Wykaz stron internetowych

15. Accuray. Celebrating 30 Years of Innovation: The Evolution of the CyberKnife System. <https://www.accuray.com/cyberknife/cyberknife-history/>. Data dostępu: 23.04.2025.
16. CyberKnife. Find a Treatment Center Near You. <https://cyberknife.com/treatment-centers/>. Data dostępu: 23.04.2025.
17. TMS. CyberKnife. <https://www.tms.com.pl/portfolio/synchrony-sledzenie-faz-oddechowych-pacjenta/>. Data dostępu 24.04.2025.
18. CyberKnife. Liver Cancer. <https://cyberknife.com/liver-cancer/>. Data dostępu: 05.05.2025.

5. MOLEKULARNE MECHANIZMY ORAZ ASPEKTY EPIDEMIOLOGICZNO-KLINICZNE KANCEROGENEZY UROTELIALNEJ INDUKOWANEJ DYMEM TYTONIOWYM

Łukasz Kwaśniak, Aleksandra Grzesiak, Patrycja Zychowicz, Weronika Kwaśniak, Agata Grzesiak

Uniwersytet Jana Długosza

Collegium Medicum im. dr. W. Biegańskiego, Wydział Prawa i Ekonomii

Al. Armii Krajowej 13/15, 42-200 Częstochowa

E-mail: kwasniakukasz@gmail.com, aleksandrgrzesiak2003@wp.pl,
patrycja_zychowicz@o2.pl, weronikak415@gmail.com, agataagrzes@gmail.com

Wiktor Wojciechowski

Akademia WSB w Dąbrowie Górniczej

ul. Cieplaka 1c, 41-300 Dąbrowa Górnicza

E-mail: wiktorwojciechowski433@gmail.com

1. Wstęp

Nowotwory złośliwe pęcherza moczowego stanowią olbrzymie wyzwanie dla współczesnych systemów ochrony zdrowia na całym świecie plasując się na dziesiątym miejscu pod względem częstości występowania w populacji ogólnej oraz na siódmym wśród mężczyzn [Michalik, Wróbel, Fedorowicz i Michalik, 2025; Wang i in., 2025]. Przewlekły przebieg kliniczny oraz niezwykle wysoka tendencja do wznów wymuszają na pacjentach konieczność stałego monitorowania urologicznego co drastycznie pogarsza ich codzienne funkcjonowanie i generuje ogromne koszty dla całego społeczeństwa [Wang i in., 2025]. Udowodniono naukowo że palenie papierosów jest dominującym czynnikiem etiologicznym który można całkowicie wyeliminować a nałóg ten przyczynia się do powstania od pięćdziesięciu do sześćdziesięciu pięciu procent wszystkich guzów urotelialnych [Wang i in., 2025; Zhan i in., 2024]. Na podstawie szeroko zakrojonych analiz epidemiologicznych stwierdzono że osoby aktywnie palące są od dwóch do czterech razy bardziej narażone na rozwój tej patologii niż te które nigdy nie sięgały po wyroby tytoniowe [Wang i in., 2025]. Prawdopodobieństwo zachorowania wyraźnie jednak spada po rzuceniu nałogu o czym świadczy wskaźnik ryzyka względnego wynoszący 3,47 dla aktywnych palaczy w zestawieniu z wartością 2,04 u osób które trwale zerwały z uzależnieniem [Cumberbatch, Rota, Catto i La Vecchia, 2016]. Należy przy tym jednoznacznie zaznaczyć że przebywanie w otoczeniu dymu tytoniowego czyli tak zwane “palenie bierne” również odgrywa istotną rolę w procesie kancerogenezy znacząco zwiększając ryzyko powstawania ognisk nowotworowych w drogach moczowych [Cumberbatch i in., 2016].

Z punktu widzenia biologii molekularnej dym tytoniowy obfituje w silne kancerogeny takie jak aminy aromatyczne do których zalicza się 4-aminobifenyl i 2-naftyloaminę będące bezpośrednią przyczyną powstawania defektów i mutacji w materiale genetycznym urotelium

[Scherer, Riedel, Pluym i Scherer, 2022; Wang i in., 2025]. Równolegle sama nikotyna oraz produkty jej przemian metabolicznych sprzyjają niekontrolowanym podziałom komórkowym i modulują odpowiedź układu odpornościowego co w konsekwencji może stanowić barierę dla skuteczności nowoczesnych leków immunologicznych [Zhan i in., 2024]. Co więcej toksyny zawarte w papierosach wymuszają na komórkach nowotworowych adaptację metaboliczną objawiającą się zintensyfikowaną produkcją kwasów tłuszczowych pod kontrolą enzymu FASN co z kolei przyspiesza agresywny rozrost guza w pęcherzu [Amara i in., 2026].

Patrząc z perspektywy codziennej praktyki urologicznej choroba ta dotyczy głównie osoby w podeszłym wieku u których pierwszą i najważniejszą manifestacją kliniczną jest zazwyczaj bezbolesny krwimocz [Michalik i in., 2025]. Ponieważ pacjenci geriatryczni często zmagają się z licznymi schorzeniami współistniejącymi dobór optymalnej ścieżki leczenia wymaga ścisłej współpracy lekarzy wielu specjalności i zindywidualizowanego planu terapii [Michalik i in., 2025]. Z tego względu wnikliwe poznanie powiązań między dymem tytoniowym, a patomechanizmami molekularnymi nowotworzenia urotelialnego jest warunkiem koniecznym do opracowywania lepszych metod wczesnego zapobiegania oraz o wiele skuteczniejszych terapii personalizowanych [Wang i in., 2025].

2. Materiały i metody

Niniejsza praca przeglądowa powstała w oparciu o celowy dobór literatury naukowej pochodzącej z ogólnodostępnych baz artykułów naukowych z dziedziny medycyny. Do opracowania włączono publikacje które w sposób bezpośredni opisywały związek między paleniem tytoniu, a patogenezą nowotworów urotelialnych [Cumberbatch, Rota, Catto i La Vecchia, 2016; Michalik, Wróbel, Fedorowicz i Michalik, 2025; Wang i in., 2025]. Wybór poszczególnych artykułów badawczych i przeglądowych opierał się przede wszystkim na ich ścisłym dopasowaniu do poruszanej tematyki oraz wysokiej wartości merytorycznej [Wang i in., 2025]. W tekście uwzględniono badania oceniające powstawanie uszkodzeń kwasu deoksyrybonukleinowego pod wpływem kancerogenów tytoniowych a także ogólne wskaźniki zapadalności i śmiertelności nowotworowej [Bellamri i in., 2019; Cumberbatch i in., 2016]. Skorzystano również z doniesień wykorzystujących nowoczesne techniki wieloomiczne do oceny patologicznej przebudowy szlaków kwasów tłuszczowych oraz wpływu genów metabolizmu nikotyny na komórki nowotworowe [Amara i in., 2026; Zhan i in., 2024]. Całość opisanego materiału wzbogacono o wyniki kontrolowanych analiz klinicznych mierzących stężenia amin aromatycznych w moczu palaczy oraz o współczesne zalecenia dotyczące opieki nad obciążonymi pacjentami w wieku podeszłym [Michalik i in., 2025; Scherer, Riedel, Pluym i Scherer, 2022].

3. Wyniki i dyskusja

3.1. Epidemiologiczny wymiar kancerogenezy urotelialnej

Analiza danych epidemiologicznych jednoznacznie potwierdza, że dym tytoniowy jest najistotniejszym czynnikiem ryzyka zachorowania na raka pęcherza moczowego [Wang i in., 2025]. Badania wykazują, że osoby palące papierosy są obciążone od dwóch do czterech razy wyższym ryzykiem wystąpienia tego nowotworu w porównaniu do osób, które nigdy nie

palili [Wang i in., 2025]. W obszernej metaanalizie udowodniono, że względne ryzyko zachorowania dla wszystkich palaczy wynosi 2,58, natomiast w grupie aktywnych palaczy wzrasta ono aż do poziomu 3,47 [Cumberbatch i in., 2016]. Niezwykle istotnym aspektem z punktu widzenia zdrowia publicznego jest fakt, że rzucenie palenia realnie redukuje to zagrożenie, co odzwierciedla obniżony wskaźnik ryzyka wynoszący 2,04 dla byłych palaczy [Cumberbatch i in., 2016]. Co więcej, narażenie na bierne palenie (ekspozycja środowiskowa) również zostało zidentyfikowane jako czynnik promujący kancerogenezę urotelialną, ze wskaźnikiem ryzyka na poziomie 1,40 w porównaniu do całkowitego braku ekspozycji [Cumberbatch i in., 2016]. Mimo że globalne odsetki osób palących ulegają stopniowemu obniżeniu, to zapadalność na raka pęcherza moczowego wciąż utrzymuje się na stabilnie wysokim poziomie [Wang i in., 2025]. Stan ten może wynikać ze zmian w stężeniach i rodzajach kancerogenów wdychanych przez palaczy na przestrzeni ostatnich dekad [Wang i in., 2025].

3.2. Biomarkery ekspozycji i aminy aromatyczne w dymie tytoniowym

Dym papierosowy dostarcza do organizmu szereg wysoce rakotwórczych substancji chemicznych, wśród których szczególne znaczenie w onkogenezie urotelialnej przypisuje się aminom aromatycznym [Wang i in., 2025]. Związki takie jak o-toluidyna, 2-naftyloamina (2-AN) czy 4-aminobifenyl (4-ABP) są oficjalnie sklasyfikowane jako udowodnione ludzkie kancerogeny, które inicjują powstawanie guzów pęcherza moczowego [Scherer i in., 2022]. W rygorystycznych badaniach klinicznych z udziałem użytkowników różnych produktów zawierających nikotynę wykazano, że osoby palące tradycyjne papierosy wydają z moczem znacznie podwyższone ilości o-toluidyny, 2-AN, 3-ABP oraz 4-ABP [Scherer i in., 2022]. Stężenia te były istotnie wyższe nie tylko w stosunku do osób całkowicie niepalących, ale także w porównaniu do użytkowników e-papierosów, podgrzewaczy tytoniu czy osób stosujących nikotynową terapię zastępczą [Scherer i in., 2022]. Ponadto, wyłącznie u palaczy tradycyjnych papierosów zaobserwowano stałą, wysoce istotną statystycznie korelację między dawką wchłoniętego dymu (mierzoną między innymi ilością wypalanych papierosów i poziomem kotyniny w osoczu) a wydalaniem rakotwórczych amin z moczem [Scherer i in., 2022]. Wyniki te wskazują jednoznacznie na specyficzne i niezwykle silne zagrożenie onkologiczne wynikające z procesu spalania tytoniu, które obciąża organizm toksynami bezpośrednio odpowiedzialnymi za transformację nowotworową urotelium [Scherer i in., 2022].

3.3. Szlaki bioaktywacji i genetyczne uwarunkowania uszkodzeń molekularnych

Dym tytoniowy dostarcza do organizmu szereg wysoce reaktywnych związków chemicznych, wśród których szczególne znaczenie przypisuje się aminom aromatycznym, nitrozoaminom oraz wielopierścieniowym węglowodom aromatycznym [Wang i in., 2025]. Aminy aromatyczne, takie jak na przykład 4-aminobifenyl, wymagają wieloetapowej bioaktywacji, w której kluczową rolę odgrywają enzymy takie jak N-acetylotransferaza 2 oraz izoenzymy cytochromu P450, w tym głównie CYP1A2 [Wang i in., 2025]. Badania na liniach komórkowych ludzkiego nabłonka pęcherza moczowego dowiodły, że bioaktywacja 4-aminobifenylu może zachodzić również bezpośrednio w urotelium przy udziale lokalnie ulegających ekspresji enzymów z rodziny cytochromu, ze szczególnym uwzględnieniem

izoformy CYP2A13 [Bellamri i in., 2019]. Proces ten prowadzi do generowania wysoce reaktywnych metabolitów, które wchodzą w kowalencyjne interakcje z kwasem deoksyrybonukleinowym, tworząc addukty trwale uszkadzające strukturę podwójnej helisy [Bellamri i in., 2019; Wang i in., 2025]. Gromadzenie się tych nienaprawionych uszkodzeń stanowi bezpośrednią przyczynę powstawania mutacji genetycznych oraz aberracji chromosomowych napędzających proces kancerogenezy [Wang i in., 2025]. Osobnicza podatność na rozwój raka pęcherza moczowego jest przy tym silnie uzależniona od polimorfizmów genetycznych, gdzie fenotyp wolnego acetylatora dla enzymu N-acetylotransferazy 2 oraz warianty zerowe genu GSTM1 drastycznie zwiększają ryzyko choroby ze względu na niewydolną detoksykację amin aromatycznych [Wang i in., 2025]. Dodatkowo zaawansowane badania asocjacyjne całego genomu zidentyfikowały specyficzne mutacje w genach kodujących białka zaangażowane w systemy naprawy kwasu deoksyrybonukleinowego, takie jak ERCC2, NBN oraz XPC, które przy jednoczesnej ciągłej ekspozycji na dym tytoniowy znacznie upośledzają zdolności naprawcze komórki [Wang i in., 2025]. Pełne zrozumienie tych powiązań molekularnych pozwala na precyzyjniejsze określenie grup najwyższego ryzyka onkologicznego wśród osób palących oraz ukierunkowuje działania w zakresie profilaktyki wtórnej [Wang i in., 2025].

3.4. Przebudowa metaboliczna i rola enzymu FASN w progresji nowotworu

Ekspozycja komórek raka pęcherza moczowego na dym tytoniowy indukuje głęboką rearanżację wewnątrzkomórkowych szlaków metabolicznych, która w znaczącym stopniu sprzyja przeżyciu i niezwykle szybkiej proliferacji nowotworu [Amara i in., 2026]. Kluczowym elementem tej przebudowy jest zjawisko nasilonej syntezy kwasów tłuszczowych, za którą bezpośrednio odpowiada nadmierna aktywacja syntazy kwasów tłuszczowych znanej w literaturze pod akronimem FASN [Amara i in., 2026]. Wieloomiczne analizy materiału tkankowego pobranego od pacjentów udowodniły, że zarówno lokalny poziom kwasów tłuszczowych, jak i sama ekspresja białka FASN są znacząco podwyższone specyficznym w grupie chorych będących aktualnymi palaczami [Amara i in., 2026]. Pod stałym wpływem dymu tytoniowego komórki urotelialne modyfikują swoje preferencje energetyczne i zaczynają intensywnie wykorzystywać glutaminę jako główne źródło węgla, aby poprzez mechanizm redukcyjnej karboksylacji napędzać masową produkcję lipidów niezbędnych do formowania błon komórkowych i agresywnego wzrostu guza [Amara i in., 2026]. Mechanizm ten jest ściśle sprzężony z szeroko pojętymi modyfikacjami epigenetycznymi, ponieważ obecność dymu papierosowego wywołuje hiperacetylację histonów na przykład w pozycjach H3K18ac oraz H3K27ac, co obniża zwartość chromatyny i nasila transkrypcję genów kodujących enzym FASN [Amara i in., 2026]. Ponadto aktywacja tego lipidowego szlaku metabolicznego współdziała z systemami naprawy kwasu deoksyrybonukleinowego uszkanowanego przez krążące kancerogeny, gdzie podwyższona aktywność enzymu FASN wspiera produkcję białek takich jak POLB oraz XRCC1 bezpośrednio zaangażowanych w mechanizmy naprawcze komórki nowotworowej [Amara i in., 2026]. Badania przedkliniczne przeprowadzone na modelach chorioallantoidalnych oraz zaawansowanych ksenograftach zwierzęcych wyraźnie udowodniły, że zarówno genetyczne wyciszenie, jak i celowane zablokowanie farmakologiczne enzymu FASN za pomocą nowoczesnych inhibitorów takich jak TVB-2640 czy TVB-3166 prowadzi do drastycznego

zahamowania wzrostu guza indukowanego dymem tytoniowym [Amara i in., 2026]. Odkrycia te bezsprzecznie rzucają zupełnie nowe światło na procesy onkogenezy urotelialnej i wyraźnie sugerują, że ukierunkowane leczenie hamujące szlaki syntezy lipidów może stanowić obiecującą strategię terapeutyczną, w szczególności dedykowaną grupie pacjentów mocno obciążonych wywiadem nikotynowym [Amara i in., 2026].

3.5. Metabolizm nikotyny a mikrośrodowisko immunologiczne guza

Nikotyna oraz jej główne metabolity, takie jak kotynina, wykazują silne działanie promujące wzrost guza, stymulując procesy proliferacji komórek, angiogenezy oraz przetrwania nowotworu w niekorzystnych warunkach [Zhan i in., 2024]. W najnowszych badaniach wykorzystujących zaawansowane algorytmy uczenia maszynowego zidentyfikowano specyficzną sygnaturę genową związaną z metabolizmem nikotyny, która opiera się na ekspresji czterech kluczowych genów: AHNAK, MKRN1, SFXN4 oraz ZMYND8 [Zhan i in., 2024]. Wysoki wynik tej sygnatury jednoznacznie koreluje z gorszym rokowaniem klinicznym pacjentów cierpiących na raka pęcherza moczowego [Zhan i in., 2024]. Analizy bioinformatyczne wykazały, że geny związane z metabolizmem nikotyny wywierają ogromny wpływ na kształtowanie mikrośrodowiska immunologicznego w otoczeniu nowotworu [Zhan i in., 2024]. Udowodniono, że u pacjentów z wysokim wynikiem sygnatury występuje wzmożona infiltracja fibroblastów związanych z nowotworem (CAF), które tworzą wysoce immunosupresyjne środowisko komórkowe [Zhan i in., 2024]. Komórki te mogą hamować aktywność przeciwnowotworową limfocytów T i drastycznie zmniejszać skuteczność leczenia, nawet pomimo równoległej wysokiej ekspresji punktów kontrolnych takich jak PD-1 czy CTLA4 w tej grupie chorych [Zhan i in., 2024]. Szczegółowe analizy in vitro ujawniły ponadto, że gen MKRN1 funkcjonuje jako czynnik pronowotworowy, a jego laboratoryjne wyciszenie skutecznie hamuje procesy namnażania i migracji komórek raka pęcherza moczowego [Zhan i in., 2024]. Co niezwykle istotne, bezpośredni stymulujący wpływ samej nikotyny na agresywność komórek urotelialnych zostaje całkowicie zniesiony w przypadku zablokowania genu MKRN1, co czyni go wysoce obiecującym celem dla przyszłych terapii onkologicznych [Zhan i in., 2024].

3.6. Obraz kliniczny i wyzwania w leczeniu pacjentów geriatrycznych

Rak pęcherza moczowego jest patologią diagnozowaną najczęściej u osób w wieku podeszłym, co stawia przed współczesnym systemem ochrony zdrowia specyficzne wyzwania diagnostyczne i terapeutyczne [Michalik, Wróbel, Fedorowicz i Michalik, 2025]. Zdecydowanie najczęstszym oraz najwcześniejszym objawem tej choroby nowotworowej jest widoczny krwimocz, który w każdym przypadku powinien skłaniać do wdrożenia natychmiastowej i pogłębionej diagnostyki urologicznej [Michalik i in., 2025]. Z uwagi na obciążenie licznymi chorobami współistniejącymi nie wszyscy starsi pacjenci mogą odnieść realną korzyść z radykalnego leczenia chirurgicznego, jakim jest całkowite wycięcie pęcherza moczowego [Michalik i in., 2025]. Z tego powodu absolutnie kluczowym etapem przed podjęciem ostatecznej decyzji terapeutycznej jest kompleksowa ocena geriatryczna, która szczegółowo uwzględnia zespół kruchości, ogólny stan odżywienia organizmu oraz wydolność funkcji poznawczych pacjenta [Michalik i in., 2025]. Odpowiednia i staranna kwalifikacja medyczna pozwala wyłonić tych chorych, którzy bez nadmiernego ryzyka

ciężkich powikłań i zgonu okołoperacyjnego bezpiecznie zniosą zabieg radykalnej cystektomii lub systemową chemioterapię opartą na związkach platyny [Michalik i in., 2025]. Wraz z dynamicznym postępem onkologii urologicznej coraz większe znaczenie w praktyce klinicznej zyskuje minimalnie inwazyjna terapia trójmodalna, która obejmuje przezcewkową elektroresekcję guza połączoną z ogólnoustrojową chemioterapią oraz celowaną radioterapią [Michalik i in., 2025]. Metoda ta stwarza pacjentom realną szansę na wyleczenie nowotworu przy jednoczesnym zachowaniu własnego narządu, co jest niezwykle istotne dla utrzymania akceptowalnej jakości życia, szczególnie u osób niekwalifikujących się do rozległych operacji brzusznych [Michalik i in., 2025]. Należy podkreślić, że optymalne i bezpieczne prowadzenie pacjenta geriatrycznego obciążonego nałogiem tytoniowym wymaga ścisłej, ciągłej współpracy urologa, onkologa, geriatry oraz specjalistów medycyny paliatywnej [Michalik i in., 2025].

4. Podsumowanie

Kancerogeneza urotelialna indukowana dymem tytoniowym jest niezwykle złożonym, wieloetapowym procesem, w którym nierozzerwalnie nakładają się na siebie szkodliwe czynniki środowiskowe, uwarunkowania genetyczne oraz patologiczne adaptacje metaboliczne komórek [Wang i in., 2025]. Przewlekła ekspozycja organizmu na aminy aromatyczne prowadzi do powstawania bezpośrednich uszkodzeń kwasu deoksyrybonukleinowego, a wrodzona zmienność osobnicza w zakresie wydolności enzymów detoksykacyjnych dodatkowo modyfikuje ostateczne ryzyko onkologiczne pacjenta [Bellamri i in., 2019; Scherer, Riedel, Pluym i Scherer, 2022]. Ponadto toksyny zawarte w dymie papierosowym wymuszają na komórkach nowotworowych głęboką przebudowę wewnątrzkomórkową, stymulując agresywny wzrost guza poprzez zjawisko redukcyjnej karboksylacji i zależną od enzymu FASN wzmożoną syntezę kwasów tłuszczowych [Amara i in., 2026]. Jednocześnie sama nikotyna oraz ściśle powiązane z nią szlaki genetyczne kreują w mikrośrodowisku nowotworu warunki silnie immunosupresyjne, które skutecznie osłabiają naturalną odpowiedź układu odpornościowego i zmniejszają potencjalną skuteczność nowoczesnej immunoterapii [Zhan i in., 2024]. Z perspektywy codziennej medycyny rak pęcherza moczowego stanowi olbrzymie wyzwanie kliniczne, ponieważ diagnozowany jest w głównej mierze u pacjentów geriatrycznych obciążonych wielochorobowością, co bezwzględnie wymusza wdrażanie zindywidualizowanych planów leczenia opartych na kompleksowej ocenie geriatrycznej i nowoczesnych terapiach oszczędzających narząd [Michalik, Wróbel, Fedorowicz i Michalik, 2025]. Mimo ogromnego postępu w diagnostyce i farmakoterapii urologicznej, absolutnym fundamentem profilaktyki pierwotnej i wtórnej oraz warunkiem poprawy rokowania pacjentów pozostaje całkowite zaprzestanie palenia wszelkich wyrobów tytoniowych [Cumberbatch, Rota, Catto i La Vecchia, 2016].

Bibliografia:

1. Amara C.S., Piyrathna D.W.B., Kamal A.H.M. i in. (2026). Cigarette smoke induces FASN-dependent fatty acid metabolic rewiring to drive bladder cancer progression. *Cancer Letters*, 653, 218562.
2. Bellamri M., Yao L., Bonala R., Johnson F., Von Weymarn L.B., Turesky R.J. (2019). Bioactivation of the tobacco carcinogens 4-aminobiphenyl (4-ABP) and 2-amino-9H-

- pyrido [2,3-b]indole (AaC) in human bladder RT4 cells. *Archives of Toxicology*, 93(7), 1893-1902.
3. Cumberbatch M.G., Rota M., Catto J.W.F., La Vecchia C. (2016). The Role of Tobacco Smoke in Bladder and Kidney Carcinogenesis: A Comparison of Exposures and Meta-analysis of Incidence and Mortality Risks. *European Urology*, 70, 458-466.
 4. Michalik T., Wróbel M., Fedorowicz S.A., Michalik K. (2025). Rak pęcherza moczowego u pacjentów geriatrycznych. *Medycyna Pracy*, 76(3), 233-239.
 5. Scherer G., Riedel K., Pluym N., Scherer M. (2022). Assessment of the Exposure to Aromatic Amines in Users of Various Tobacco/Nicotine Products. *ACS Omega*, 7, 41775-41782.
 6. Wang Y., Zhou H., Tang Z., He Z., Zhuo H., Huang Y., Kong J. (2025). Smoking and bladder cancer: insights into pathogenesis and public health implications from a bibliometric analysis (1999-2023). *Substance Abuse Treatment, Prevention, and Policy*, 20, 25.
 7. Zhan Y., Weng M., Guo Y., Lv D., Zhao F., Yan Z., Jiang J., Xiao Y., Yao L. (2024). Identification and validation of the nicotine metabolism-related signature of bladder cancer by bioinformatics and machine learning. *Frontiers in Immunology*, 15, 1465638.

6. WPLYW PROTOKOŁU ERAS NA CZĘSTOŚĆ POWIKŁAŃ I CZAS HOSPITALIZACJI W OSTRYCH SCHORZENIACH JAMY BRZUSZNEJ

Łukasz Kwaśniak, Aleksandra Grzesiak, Patrycja Zychowicz, Weronika Kwaśniak, Agata Grzesiak

Uniwersytet Jana Długosza

Collegium Medicum im. dr. W. Biegańskiego, Wydział Prawa i Ekonomii

Al. Armii Krajowej 13/15, 42-200 Częstochowa

E-mail: kwasniakukasz@gmail.com, aleksandragrzesiak2003@wp.pl,
patrycja_zychowicz@o2.pl, weronikak415@gmail.com, agataaagrzes@gmail.com

Wiktor Wojciechowski

Akademia WSB w Dąbrowie Górniczej

ul. Cieplaka 1c, 41-300 Dąbrowa Górnicza

E-mail: wiktorwojciechowski433@gmail.com

1. Wstęp

Ostre schorzenia jamy brzusznej stanowią stany bezpośredniego zagrożenia życia, które ze względu na nagły rozwój procesów zapalnych lub urazowych wymagają pilnej interwencji chirurgicznej, co zawsze wiąże się z podwyższonym ryzykiem zachorowalności oraz śmiertelności [Sharma, Payal, Kumar i Huda, 2021]. Przez wiele dekad tradycyjne modele opieki okołoperacyjnej w chirurgii nagłej opierały się na restrykcyjnych zachowaniach, takich jak długotrwałe głodzenie przed i po zabiegu, rutynowe stosowanie zgłębników nosowo-żołądkowych oraz przedłużone unieruchomienie pacjenta w łóżku szpitalnym [Pędziwiatr i in., 2018]. Takie dogmatyczne podejście prowadziło do znacznego nasilenia katabolizmu, rozwoju groźnej insulinooporności oraz utraty masy mięśniowej, co w konsekwencji znacząco upośledzało proces mobilizacji chorych i wydłużało czas trwania hospitalizacji [Pędziwiatr i in., 2018]. W odpowiedzi na te powszechne problemy pod koniec ubiegłego wieku duński profesor chirurgii Henrik Kehlet zainicjował nowatorską ścieżkę kliniczną zwaną protokołem przyspieszonego powrotu do zdrowia po operacji, która zakwestionowała dotychczasowe nawyki i wprowadziła standaryzację opieki opartą na dowodach naukowych [Pędziwiatr i in., 2018]. Głównym celem tego wielodyscyplinarnego podejścia stała się skuteczna minimalizacja stresu operacyjnego pacjenta, zapobieganie powikłaniom pooperacyjnym oraz jak najszybsze przywrócenie prawidłowych funkcji narządów [Sun, Wang, Mao i Wang, 2020]. Od momentu swojego rynkowego debiutu wytyczne te zyskały olbrzymie uznanie na całym świecie i stały się bezdyskusyjnym złotym standardem w planowych zabiegach chirurgicznych, w szczególności w obrębie chirurgii kolorektalnej [Ahmed i in., 2024]. Wdrożenie tych spójnych zaleceń w chirurgii planowej jednoznacznie udowodniło swoją gigantyczną skuteczność poprzez drastyczną redukcję liczby powikłań pooperacyjnych oraz niezwykle cenne skrócenie czasu pobytu pacjentów na

oddziałach szpitalnych [Ahmed i in., 2024]. Wraz z upływem czasu ta rewolucyjna koncepcja zaczęła być powszechnie adaptowana do innych dziedzin medycyny zabiegowej, obejmując między innymi operacje żołądka, trzustki oraz wątroby, jednakże jej rutynowe zastosowanie w trudnych warunkach ostrych dyżurów chirurgicznych wciąż pozostaje obiektem intensywnych debat [Ahmed i in., 2024; Pędziwiatr i in., 2018].

Główną barierą hamującą powszechne wdrażanie pełnego pakietu protokołu w chirurgii nagłej jest wysoce nieprzewidywalny charakter tych operacji oraz ewidentny brak czasu na przeprowadzenie precyzyjnego przygotowania pacjenta, na przykład poprzez zalecaną optymalizację żywieniową [Ahmed i in., 2024]. Ponadto pacjenci operowani w trybie pilnym z powodu nagłych schorzeń takich jak perforacja wrzodu żołądkowo-dwunastniczego często trafiają na blok operacyjny w ciężkim stanie ogólnym połączonym ze wstrząsem, co drastycznie utrudnia szybką mobilizację pooperacyjną oraz sprawne wprowadzanie pokarmów doustnych [Ahmed i in., 2024; Tandup i in., 2023]. Mimo istnienia tych obiektywnych trudności i ograniczeń rosnąca liczba rzetelnych badań naukowych dobitnie sugeruje, że nawet częściowe lub zmodyfikowane zastosowanie kluczowych elementów tej ścieżki w nagłych przypadkach może przynieść pacjentom ogromne korzyści kliniczne [Ahmed i in., 2024]. Zastosowanie zindywidualizowanych i dostosowanych do sytuacji ścieżek opieki pooperacyjnej, które obejmują między innymi unikanie rutynowego drenażu jamy brzusznej, wczesne rozpoczęcie żywienia doustnego oraz multimodalną analgezję bez użycia opioidów, bezpośrednio przyczynia się do zauważalnie szybszej i bezpieczniejszej rekonwalescencji chorych [Tandup i in., 2023]. W tym kontekście zwraca się baczna uwagę na pacjentów geriatrycznych, dla których każda interwencja w trybie nagłym stanowi ekstremalne obciążenie, a zoptymalizowana opieka minimalizująca uszkodzenia i stres pozwala o wiele efektywniej przywrócić ich utracony status funkcjonalny [Paduraru i in., 2017]. Najnowsze metaanalizy i przeglądy systematyczne wyraźnie potwierdzają, że wdrożenie protokołów przyspieszonego powrotu do zdrowia u osób w podeszłym wieku jest całkowicie bezpieczne i skutecznie chroni przed licznymi pooperacyjnymi komplikacjami, w tym powikłaniami krążeniowo-oddechowymi [Paduraru i in., 2017]. Co więcej, dogłębne analizy obejmujące populację pediatryczną poddawaną zabiegom brzuszным wykazały, że zastosowanie tej zintegrowanej metody postępowania prowadzi do zmniejszenia liczby powikłań o połowę oraz pozwala na zredukowanie odsetka trzydziestodniowych readmisji do szpitala aż o trzydzieści sześć procent [Hidayah i in., 2023]. Z perspektywy ekonomiczno-organizacyjnej wdrażanie omawianych procedur na oddziałach chirurgii nagłej jest również niezwykle opłacalne kosztowo, gdyż skrócenie czasu hospitalizacji nawet o kilkadziesiąt godzin generuje ogromne oszczędności finansowe w skali każdego wyleczonego przypadku [Bisagni i in., 2024]. Biorąc pod uwagę rosnącą złożoność nowoczesnej opieki medycznej, konieczne staje się precyzyjne zidentyfikowanie wskaźników fizjologicznych oraz wypracowanie ujednoliconych ram postępowania dla oddziałów ratunkowych [Puccetti, Elmore i Rosati, 2022]. Niniejszy rozdział ma na celu kompleksowe przedstawienie bieżącej wiedzy na temat rzeczywistego wpływu tych protokołów na kluczowe rezultaty kliniczne u pacjentów operowanych w trybie ostro-dyżurowym [Ahmed i in., 2024].

2. Materiały i metody

Niniejszy przegląd literatury oparto na analizie anglojęzycznych badań klinicznych, kohortowych oraz metaanaliz z baz PubMed, MEDLINE, EMBASE i Cochrane Library, które porównywały protokół ERAS z tradycyjną opieką w chirurgii nagłej [Hidayah i in., 2023; Ahmed i in., 2024; Sun i in., 2020]. Analizą objęto pacjentów (w tym populację pediatryczną) z ostrymi patologiami jamy brzusznej, wykluczając jednocześnie chorych we wstrząsie, z rozległymi urazami, otwartą jamą brzuszną oraz z ciężkimi schorzeniami współistniejącymi [Sharma i in., 2021; Hidayah i in., 2023; Tandup i in., 2023; Bisagni i in., 2024]. Z uwagi na nagły tryb operacji badane ścieżki kliniczne (tailored-ERAS) przymusowo pomijały prehabilitację przedoperacyjną, koncentrując się na bezopioioidowej analgezji multimodalnej, wczesnym usuwaniu zgłębników oraz natychmiastowym wdrożeniu żywienia i mobilizacji chorych [Tandup i in., 2023; Ahmed i in., 2024; Puccetti i in., 2022; Pędziwiatr i in., 2018; Sun i in., 2020]. Pierwszorzędowym punktem końcowym była całkowita długość hospitalizacji pacjentów, natomiast punkty drugorzędowe obejmowały wskaźniki powrotu funkcji przewodu pokarmowego, odsetek powikłań klasyfikowanych w skali Clavien-Dindo, konieczność reoperacji, trzydziestodniowe readmisje oraz śmiertelność [Sharma i in., 2021; Hidayah i in., 2023; Tandup i in., 2023; Bisagni i in., 2024; Sun i in., 2020].

3. Wyniki i dyskusja

3.1. Wpływ na czas hospitalizacji

Wdrożenie zmodyfikowanego protokołu przyspieszonego powrotu do zdrowia w chirurgii nagłej wykazuje najbardziej spektakularny wpływ na skrócenie całkowitego czasu hospitalizacji pacjentów [Sharma i in., 2021; Tandup i in., 2023]. Jak dowodzą prospektywne badania z randomizacją, chorzy prowadzeni zgodnie ze ścieżką ERAS opuszczają szpital znacznie wcześniej w porównaniu do grupy objętej standardową opieką [Tandup i in., 2023]. W badaniach obejmujących pacjentów operowanych z powodu perforacji żołądkowo-dwunastniczej wykazano, że średni czas pobytu ulega istotnej statystycznie redukcji z 9,56 dnia w grupie kontrolnej do zaledwie 6,32 dnia w grupie badanej [Tandup i in., 2023]. W innym badaniu dotyczącym nagłych laparotomii udowodniono zmniejszenie średniego czasu hospitalizacji z 8,75 dnia u pacjentów z opieką tradycyjną do 5,56 dnia w grupie ERAS, przy czym mediana pobytu wyniosła odpowiednio 7 oraz 4 dni [Sharma i in., 2021]. Podobne tendencje zaobserwowano we włoskim badaniu, w którym mediana hospitalizacji spadła z 12 do 9 dni [Bisagni i in., 2024]. Takie skrócenie czasu pobytu na oddziale przekłada się bezpośrednio na wymierne korzyści ekonomiczne dla placówek medycznych, co na podstawie kalkulacji wyceniono na średnią oszczędność rzędu 1022,78 euro na każdego leczzonego pacjenta [Bisagni i in., 2024]. Co niezwykle istotne, ten pozytywny efekt odnotowano we wszystkich grupach wiekowych, w tym w chirurgii kolorektalnej, gdzie wdrożenie ERAS skracało hospitalizację o średnio 2 do 3 dni [Pędziwiatr i in., 2018].

3.2. Częstość występowania powikłań pooperacyjnych

Analiza częstości występowania powikłań pooperacyjnych niezbicie dowodzi, że zastosowanie zindywidualizowanych ścieżek opieki w chirurgii nagłej prowadzi do realnego spadku wskaźników ogólnej zachorowalności [Ahmed i in., 2024]. W jednym z badań

wykazano, że pooperacyjna niedrożność porażenna jelit występowała u zaledwie 8 procent pacjentów z grupy ERAS w porównaniu do aż 24,5 procent w grupie opieki tradycyjnej [Sharma i in., 2021]. Znaczącej redukcji uległy również powikłania ze strony układu oddechowego, które dotknęły 14 procent chorych w grupie ERAS, podczas gdy w grupie kontrolnej odsetek ten wynosił blisko 33 procent [Sharma i in., 2021]. Zakażenia w miejscu operowanym zaobserwowano u niespełna 37 procent pacjentów prowadzonych nowym protokołem w zestawieniu z wynikiem ponad 61 procent u pacjentów leczonych klasycznie [Sharma i in., 2021]. W obszernej metaanalizie oceniającej nagłe operacje kolorektalne odsetki powikłań spadały na korzyść protokołu ERAS z 54 procent do 26 procent w jednym z badań oraz z 37 procent do niecałych 22 procent w kolejnym [Ahmed i in., 2024]. Ponadto w badanej populacji pediatrycznej wdrożenie zaleceń ERAS wiązało się ze zmniejszeniem całkowitego wskaźnika powikłań o równe 50 procent [Hidayah i in., 2023]. Należy wyraźnie podkreślić, że we wszystkich włączonych opracowaniach zintensyfikowany proces rekonwalescencji nie pociągał za sobą istotnego wzrostu trzydziestodniowej śmiertelności, która w jednym z badanych ośrodków wynosiła odpowiednio 4 procent dla ERAS oraz 8 procent dla grupy kontrolnej [Sharma i in., 2021]. Z kolei we wspomnianej grupie dziecięcej odsetek ponownych przyjęć do szpitala w ciągu trzydziestu dni uległ zmniejszeniu aż o 36 procent [Hidayah i in., 2023].

3.3. Parametry powrotu funkcji życiowych i przewodu pokarmowego

Fundamentalnym mechanizmem leżącym u podstaw klinicznego sukcesu protokołu ERAS w chirurgii ostrego dyżuru jest błyskawiczny powrót funkcji narządowych w obrębie przewodu pokarmowego [Tandup i in., 2023]. Liczne badania dobitnie wykazały, że unikanie rutynowego utrzymywania zgłębnika nosowo-żołądkowego pozwala na diametralnie wcześniejsze oddanie pierwszych gazów, co następowało średnio po 2,52 dnia w grupie ERAS w porównaniu do 3,00 dnia w grupie kontrolnej [Tandup i in., 2023]. Samodzielne oddanie uformowanego stolca miało miejsce po 3,04 dnia u pacjentów prowadzonych zoptymalizowaną ścieżką, podczas gdy chorzy leczeni klasycznie potrzebowali na to średnio 4,00 dnia [Tandup i in., 2023]. Szybkie wprowadzanie płynnej diety doustnej rozpoczynano średnio po 2,24 dnia w grupie ERAS w zestawieniu z 3,00 dniami u chorych w tradycyjnym modelu opieki [Tandup i in., 2023]. Dodatkowym czynnikiem wspierającym rekonwalescencję była drastyczna rezygnacja z klasycznych opioidów, co w badaniach klinicznych przełożyło się na to, że podaż dodatkowej, ratunkowej analgezji dotyczyła zaledwie 8,7 procent pacjentów z grupy ERAS, w przeciwieństwie do ponad 26 procent pacjentów z grupy kontrolnej [Tandup i in., 2023]. W innej analizie wykazano, że u pacjentów poddawanych rozległej pankreatoduodenektomii wdrożenie ERAS obniżało szansę na wystąpienie opóźnionego opróżniania żołądka prawie o połowę oraz pozwalało zredukować średni czas pobytu o 4,27 dnia [Sun i in., 2020].

3.4. Specyfika opieki nad pacjentami geriatrycznymi w warunkach nagłych

Szczególną grupą trafiającą na blok operacyjny w trybie pilnym są pacjenci geriatryczni, dla których każdy ostry epizod chirurgiczny stanowi krytyczne obciążenie organizmu [Paduraru i in., 2017]. Wprowadzenie ustrukturyzowanej ścieżki szybkiej rekonwalescencji u osób w podeszłym wieku przynosi wymierne, mierzalne korzyści, co udowodniono

radikalną redukcją powikłań pooperacyjnych z 18 procent do zaledwie 5 procent w jednym badaniu, a w innym ośrodku ze wskaźnika 58,6 procent do 27,4 procent [Paduraru i in., 2017]. W jeszcze innej analizowanej grupie odsetek ogólnych komplikacji spadł z 21 procent u pacjentów leczonych tradycyjnie do zaledwie 5 procent u chorych przypisanych do protokołu ERAS [Paduraru i in., 2017]. Zoptymalizowana, bezopioidowa kontrola bólu operacyjnego połączona z wczesnym uruchamianiem drastycznie zmniejsza incydenty majaczenia oraz redukuje ryzyko groźnych powikłań krążeniowo-oddechowych, które stanowią główną przyczynę śmiertelności u pacjentów powyżej 85 roku życia [Paduraru i in., 2017]. Posiadane statystyki ostatecznie obalają krążący od dawna mit środowiskowy, jakoby sam zaawansowany wiek determinował konieczność długotrwałego i ostrożnego unieruchomienia pacjenta [Paduraru i in., 2017]. Skuteczna realizacja tych celów w ramach ostrego ERAS wymaga jednak zawsze bezbłędnej komunikacji całego zespołu medycznego oraz pełnego zaangażowania multidyscyplinarnego, w tym wsparcia przy wczesnym powrocie do sprawności [Paduraru i in., 2017; Pędziwiatr i in., 2018].

4. Podsumowanie i wnioski

Wdrożenie protokołu przyspieszonego powrotu do zdrowia (ERAS) w warunkach chirurgii nagłej, mimo obiektywnych trudności organizacyjnych i braku czasu na pełną optymalizację przedoperacyjną, stanowi bezpieczną oraz wysoce skuteczną strategię terapeutyczną [Tandup i in., 2023; Ahmed i in., 2024]. Przeprowadzona analiza literatury jednoznacznie dowodzi, że zastosowanie zindywidualizowanych, opartych na dowodach naukowych ścieżek opieki bezpośrednio przyczynia się do istotnego skrócenia czasu hospitalizacji pacjentów z ostrymi schorzeniami jamy brzusznej [Sharma i in., 2021; Tandup i in., 2023]. Co więcej, modyfikacja klasycznego postępowania poprzez rezygnację z rutynowego drenażu, wczesne usunięcie zgłębników nosowo-żołądkowych oraz wdrożenie bezopioidowej analgezji multimodalnej skutecznie przyspiesza powrót funkcji przewodu pokarmowego, w tym szybsze oddanie gazów i stolca [Tandup i in., 2023; Sun i in., 2020]. Warto stanowczo podkreślić, że ta zauważalnie szybsza rekonwalescencja nie wiąże się z jakimkolwiek wzrostem ryzyka wystąpienia ciężkich powikłań pooperacyjnych, konieczności reoperacji czy ponownych przyjęć do szpitala, a w wielu opisywanych w literaturze przypadkach wręcz istotnie obniża ogólną zachorowalność [Ahmed i in., 2024; Bisagni i in., 2024]. Szczególne korzyści z takiego zoptymalizowanego postępowania odnoszą najbardziej wrażliwi pacjenci geriatryczni oraz pediatryczni, u których rygorystyczna minimalizacja stresu operacyjnego pozwala na uniknięcie groźnych kaskad zapalnych, pooperacyjnego majaczenia i innych powikłań ogólnoustrojowych [Hidayah i in., 2023; Paduraru i in., 2017]. Należy jednak wyraźnie zaznaczyć, że pełen sukces kliniczny tego przedsięwzięcia wymaga ścisłej współpracy całego wielodyscyplinarnego zespołu medycznego, ciągłego edukowania pacjenta oraz absolutnej gotowości personelu do przełamywania utrwalonych, historycznych dogmatów chirurgicznych [Pędziwiatr i in., 2018; Puccetti i in., 2022]. Dalsze, szeroko zakrojone badania, w tym wieloośrodkowe próby z randomizacją, pozostają niezbędne do ostatecznego wypracowania i wystandaryzowania uniwersalnych wytycznych ERAS dedykowanych dla poszczególnych stanów ostrego dyżuru chirurgicznego [Puccetti i in., 2022; Ahmed i in., 2024].

Bibliografia:

1. Ahmed A., Khalid S., Sharif G., Ahmed H.H., Khattak I.A., Memon S.K. (2024). Efficacy of Enhanced Recovery After Surgery (ERAS) Protocols in Emergency Colorectal Surgery: A Meta-Analytical Comparison With Conventional Care in Terms of Outcomes and Complications. *Cureus*, 16(10), e71630.
2. Bisagni P., D'Abrosca V., Tripodi V., Armao F.T., Longhi M., Russo G., Ballabio M. (2024). Cost saving in implementing ERAS protocol in emergency abdominal surgery. *BMC Surgery*, 24, 70.
3. Hidayah B.A., Toh Z.A., Cheng L.J., Daud Syahzarin B., Zhu Y., Pölkki T., He H., Mali V.P. (2023). Enhanced recovery after surgery in children undergoing abdominal surgery: meta-analysis. *BJS Open*, 7(1), zrac147.
4. Paduraru M., Ponchietti L., Casas I.M., Svenningsen P., Pereira J., Landaluce-Olavarria A., Fonts R.F., Miguel I.P., Ugarte-Sierra B. (2017). Enhanced Recovery After Surgery (ERAS) The Evidence in Geriatric Emergency Surgery: A Systematic Review. *Chirurgia*, 112(5), 546-557.
5. Pędziwiatr M., Mavrikis J., Witowski J., Adamos A., Major P., Nowakowski M., Budzyński A. (2018). Current status of enhanced recovery after surgery (ERAS) protocol in gastrointestinal surgery. *Medical Oncology*, 35, 95.
6. Puccetti F., Elmore U., Rosati R. (2022). Application of ERAS protocols in esophagogastric emergency surgery: is it feasible and does it make sense? *Updates in Surgery*, 74, 1-5.
7. Sharma J., Payal Y.S., Kumar N., Huda F. (2021). Enhanced Recovery After Surgery Protocol in Emergency Laparotomy: A Randomized Control Study. *The Surgery Journal*, 7(2), e92-e99.
8. Sun Y.M., Wang Y., Mao Y.X., Wang W. (2020). The Safety and Feasibility of Enhanced Recovery after Surgery in Patients Undergoing Pancreaticoduodenectomy: An Updated Meta-Analysis. *BioMed Research International*, 2020, 7401276.
9. Tandup C., Chauhan A. Jr., Chauhan R., Thakur V., Sahu S., Kaman L., Khare S., Sakaray Y., Nenavath K.N., Kurdia K.C. (2023). Impact of Tailored-Enhanced Recovery After Surgery Versus Conventional Care in Patients of Gastro-Duodenal Perforation: A Pilot Randomized Control Trial. *Cureus*, 15(9), e45349.

**Aleksandra Grzesiak, Patrycja Zychowicz, Łukasz Kwaśniak, Weronika Kwaśniak,
Agata Grzesiak**

E-mail: aleksandrgrzesiak2003@wp.pl, patrycja_zychowicz@o2.pl,
kwasniakukasz@gmail.com, weronikak415@gmail.com, agataaaग्रzes@gmail.com

E-mail: wiktorwojciechowski433@gmail.com

Ataksje rdzeniowo-mózdkowe (SCA) obejmują grupę dziedzicznych chorób neurodegeneracyjnych, które z czasem prowadzą do narastania objawów neurologicznych. Większość z nich jest dziedziczona autosomalnie dominująco. Pierwsze objawy pojawiają się często w wieku dorosłym, lecz wiek zachorowania może różnić się w zależności od podtypu choroby. [Klockgether T., Mariotti C., Paulson H.L., 2019]

Najbardziej charakterystycznym objawem jest ataksja, która może powodować problemy z utrzymaniem równowagi, chodzeniem oraz wykonywaniem precyzyjnych ruchów. W przebiegu choroby mogą pojawić się także zaburzenia mowy i ruchów gałek ocznych. Obraz kliniczny nie jest jednak taki sam w każdym przypadku, ponieważ poszczególne typy SCA różnią się między sobą zarówno pod względem genetycznym, jak i klinicznym. [Cui Z.T., Mao Z.T., Yang R., Li J.J., Jia S.S., Zhao J.L., Zhong F.T., Yu P., Dong M., 2024; Klockgether T. i in. 2019; Sun Y.M., Lu C., Wu Z.Y., 2016]

Do częściej opisywanych postaci należą między innymi SCA1, SCA2, SCA3, SCA6 oraz SCA7. Poszczególne podtypy mogą mieć odmienny przebieg i różnić się występującymi objawami. Z tego powodu na podstawie samego obrazu klinicznego nie zawsze można określić rodzaj choroby. [Coarelli G., Brice A., Durr A., 2018; Klockgether T. i in. 2019; Sun Y.M. i in. 2016]

W ostatnich latach znacznie zwiększyła się wiedza na temat genetycznego podłoża SCA. Rozwój metod diagnostyki molekularnej, w tym sekwencjonowania nowej generacji, przyczynił się do identyfikacji kolejnych genów związanych z ataksjami. Umożliwił również lepsze poznanie zależności pomiędzy zmianami genetycznymi, a obrazem klinicznym choroby. [Coarelli G. i in. 2018; Sun Y.M. i in. 2016]

2. Etiologia i patogeneza

SCA są bardzo zróżnicowane pod względem genetycznym. W wielu podtypach za rozwój choroby odpowiadają ekspansje określonych powtórzeń nukleotydowych. W innych przypadkach przyczyną mogą być mutacje punktowe, insercje, delecje lub duplikacje. [Cui Z.T. i in 2024]

Szczególne miejsce zajmują choroby związane z ekspansją powtórzeń CAG. Prowadzą one do powstawania białek zawierających wydłużone odcinki poliglutaminowe. Tak zmienione białka mogą zaburzać prawidłowe funkcjonowanie komórek nerwowych. Mechanizmy prowadzące do rozwoju poszczególnych SCA nie są identyczne. W zależności od rodzaju choroby mogą mieć znaczenie między innymi toksyczne działanie nieprawidłowych białek, toksyczność RNA czy utrata prawidłowej funkcji określonych białek. Oznacza to, że podobny obraz kliniczny może być wynikiem różnych procesów zachodzących na poziomie komórkowym. W przebiegu SCA zaobserwowano zaburzenia wielu procesów komórkowych. Opisywane są między innymi problemy związane z kontrolą jakości białek, funkcjonowaniem mitochondriów i kanałów jonowych, regulacją transkrypcji oraz naprawą DNA. W konsekwencji może dochodzić do stopniowego uszkodzenia i degeneracji neuronów. [Coarelli G. i in. 2018; Cui Z.T. i in 2024]

Szczególne istotne są zmiany dotyczące neuronów Purkiniego znajdujących się w mózdzku. Ich degeneracja jest obserwowana w wielu postaciach SCA i może prowadzić do zaniku mózdzku. Nie oznacza to jednak, że wszystkie podtypy choroby przebiegają w taki sam sposób. Zakres zmian neurodegeneracyjnych może się między nimi różnić. [Klockgether T. i in. 2019]

3. Obraz kliniczny

Najbardziej charakterystycznym objawem SCA jest postępująca ataksja. Na początku może ona być stosunkowo dyskretna i przejawiać się przede wszystkim niepewnym chodem, problemami z utrzymaniem równowagi lub trudnościami w wykonywaniu precyzyjnych ruchów. W miarę postępu choroby objawy te mogą się nasilać. Przebieg i nasilenie objawów mogą różnić się pomiędzy poszczególnymi podtypami SCA. Często pojawiają się również zaburzenia mowy, zwłaszcza dysartria, oraz zaburzenia ruchów gałek ocznych, w tym oczopląs. [Cui Z.T. i in 2024; Klockgether T. i in. 2019; Sun Y.M. i in. 2016]

Obraz kliniczny SCA nie ogranicza się jednak wyłącznie do objawów mózdkowych. W zależności od podtypu mogą występować również objawy piramidowe i pozapiramidowe, neuropatia obwodowa oraz inne zaburzenia neurologiczne. [Klockgether T. i in. 2019; Sun Y.M. i in. 2016]

Różnice pomiędzy poszczególnymi podtypami można zauważyć także w zakresie objawów dodatkowych. Przykładowo, w SCA7 może występować barwnikowe zwyrodnienie siatkówki. W SCA2 opisywane są zaburzenia sakkad, natomiast SCA3 może przebiegać z różnorodnymi objawami zarówno mózdkowymi, jak i pozamózdkowymi. Niestety objawy te mogą również występować wśród innych podtypów, nie są więc wyłączne dla jednego podtypu. [Klockgether T. i in. 2019; Sun Y.M. i in. 2016]

Nie wszystkie postacie SCA rozwijają się w takim samym tempie. Diallo i wsp. w swojej metaanalizie oceniali naturalny przebieg SCA1, SCA2, SCA3 i SCA6. Wykorzystali między innymi skalę SARA do oceny nasilenia ataksji. W badaniu pokazano różnice

w tempie progresji pomiędzy analizowanymi podtypami. Wyniki te potwierdzają, że przebieg choroby może być różny w zależności od jej rodzaju. [Diallo A., Jacobi H., Tezenas du Montcel S., Klockgether T., 2021]

4. Diagnostyka

Rozpoznanie SCA wymaga połączenia informacji uzyskanych podczas badania pacjenta z wywiadem rodzinnym oraz wynikami badań dodatkowych. Bardzo ważne jest ustalenie, czy podobne objawy występowały wcześniej u innych członków rodziny. Ma to znaczenie ze względu na autosomalnie dominujący sposób dziedziczenia większości SCA. [Coarelli G. i in. 2018; Klockgether T. i in. 2019]

Podczas badania neurologicznego ocenia się między innymi koordynację ruchową, równowagę, chód, mowę oraz ruchy gałek ocznych. Do oceny nasilenia ataksji stosuje się między innymi skalę SARA. Jest ona wykorzystywana również w badaniach dotyczących naturalnego przebiegu choroby. [Diallo A. i in. 2021]

W diagnostyce wykorzystuje się również badania neuroobrazowe, przede wszystkim rezonans magnetyczny. Badania neuroobrazowe mogą wykazywać zanik mózdzku lub zmiany w innych strukturach układu nerwowego, zależnie od podtypu choroby. [Coarelli G. i in. 2018; Klockgether T. i in. 2019]

Duże znaczenie ma diagnostyka genetyczna. Jest ona szczególnie istotna ze względu na to, że podobne objawy mogą występować w różnych podtypach SCA. Wybór odpowiedniej metody badania zależy od rodzaju podejrzewanej zmiany genetycznej. [Coarelli G. i in. 2018; Cui Z.T. i in. 2024; Sun Y.M. i in. 2016]

Rozwój metod molekularnych przyczynił się również do lepszego poznania zależności pomiędzy genotypem, a fenotypem. Wynik badania genetycznego może mieć znaczenie dla potwierdzenia rozpoznania, określenia podtypu choroby oraz przeprowadzenia odpowiedniego poradnictwa genetycznego. [Coarelli G. i in. 2018; Sun Y.M. i in. 2016]

5. Leczenie

Leczenie SCA nadal pozostaje dużym wyzwaniem. Obecnie nie ma jednej terapii przyczynowej, którą można byłoby zastosować u wszystkich pacjentów. W związku z tym leczenie koncentruje się przede wszystkim na zmniejszaniu nasilenia objawów i utrzymaniu możliwie dobrej sprawności pacjenta. [Cui Z.T. i in. 2024; Yap K.H., Azmin S., Che Hamzah J., Ahmad N., van de Warrenburg B., Mohamed Ibrahim N., 2022]

Ważną częścią postępowania jest rehabilitacja. Ma ona na celu przede wszystkim utrzymanie sprawności i możliwie dobrego funkcjonowania pacjenta. Marchal-Muñoz i wsp. przeprowadzili przegląd systematyczny dotyczący skuteczności rehabilitacji u osób z dziedzicznymi ataksjami rdzeniowo-mózdkowymi. Autorzy zwrócili uwagę, że dostępne dane są ograniczone i różnią się między poszczególnymi badaniami. Mimo tego w analizowanych pracach obserwowano poprawę niektórych parametrów związanych z postawą i chodem. Opisywano również korzystne zmiany dotyczące wybranych parametrów mowy, objawów depresyjnych oraz liczby upadków. [Marchal-Muñoz A., García-Aranda M., Marchal-Muñoz M., Marchal-Escalona C., Redondo M., 2020]

Yap i wsp. dokonali przeglądu metod farmakologicznych i nefarmakologicznych stosowanych w leczeniu SCA. Zwrócili uwagę na duże różnice pomiędzy analizowanymi

badaniami. Między innymi w zakresie liczebności grup, czasu obserwacji, uwzględnianych genotypów oraz sposobu oceniania skuteczności terapii. W analizie riluzol oraz intensywna neurorehabilitacja prowadzona w warunkach stacjonarnych otrzymały rekomendację poziomu A. Według kryteriów przyjętych przez autorów. Wyniki te należy jednak interpretować z uwzględnieniem ograniczeń dostępnych badań oraz ich niejednorodności. [Yap K.H. i in. 2022]

Oprócz leczenia objawowego rozwijane są również metody, które mają wpływać bezpośrednio na molekularne podłoże choroby. Należą do nich między innymi antysensowne oligonukleotydy, interferencja RNA, terapia genowa oraz technologie edycji genów. Część tych strategii ma na celu zmniejszenie ekspresji nieprawidłowego genu lub ograniczenie powstawania jego toksycznego produktu. [Coarelli G. i in. 2018; Cui Z.T. i in 2024]

6. Rokowanie i funkcjonowanie pacjentów

SCA mają charakter postępujący. Nie wszystkie postacie SCA rozwijają się w takim samym tempie. Diallo i wsp. w metaanalizie obejmującej 1215 pacjentów ocenili progresję SCA1, SCA2, SCA3 i SCA6 za pomocą skali SARA. Roczny wzrost wyniku SARA wynosił 1,83 punktu w przypadku SCA1, 1,40 punktu w SCA2, 1,41 punktu w SCA3 oraz 0,81 punktu w SCA6. Autorzy określili progresję jako najszybszą w SCA1, pośrednią w SCA2 i SCA3 oraz najwolniejszą w SCA6. W przypadku SCA3 wykazano również szybszą progresję w badaniach przeprowadzonych w Azji i Europie w porównaniu ze Stanami Zjednoczonymi. [Diallo A. i in. 2021]

Postępujące problemy z koordynacją i utrzymaniem równowagi mogą ograniczać codzienne funkcjonowanie pacjentów. [Diallo A. i in. 2021; Klockgether T. i in. 2019]

Istotnym kierunkiem badań jest również poszukiwanie biomarkerów. Cui i wsp. wskazują, że mogą one w przyszłości potencjalnie znaleźć zastosowanie w monitorowaniu progresji choroby oraz ocenie nowych metod leczenia. [Cui Z.T. i in 2024]

7. Wnioski

SCA stanowią grupę chorób neurodegeneracyjnych, które różnią się między sobą zarówno pod względem genetycznym, jak i klinicznym. Najbardziej charakterystycznym objawem jest postępująca ataksja, której mogą towarzyszyć zaburzenia mowy, ruchów gałek ocznych oraz inne objawy neurologiczne. [Cui Z.T. i in 2024; Klockgether T. i in. 2019; Sun Y.M. i in. 2016]

Różnorodność zmian genetycznych i mechanizmów odpowiedzialnych za rozwój choroby sprawia, że poszczególne podtypy SCA mogą mieć odmienny obraz kliniczny i różne tempo progresji. Z tego względu diagnostyka genetyczna ma istotne znaczenie w potwierdzeniu rozpoznania i określeniu jego podłoża. [Coarelli G. i in. 2018; Cui Z.T. i in 2024; Sun Y.M. i in. 2016]

Obecnie leczenie SCA opiera się przede wszystkim na postępowaniu objawowym i rehabilitacji. Dostępne dane dotyczące skuteczności rehabilitacji są obiecujące w odniesieniu do niektórych obszarów, ale jednocześnie pozostają ograniczone i niejednorodne. [Marchal-Muñoz A. i in. 2020; Yap K.H. i in. 2022]

Równocześnie rozwijane są nowe strategie terapeutyczne ukierunkowane na mechanizmy molekularne choroby, w tym terapia genowa, interferencja RNA oraz

antysensowne oligonukleotydy. Dalsze badania nad podłożem genetycznym SCA, biomarkerami oraz nowymi metodami leczenia mogą przyczynić się do lepszego poznania tych chorób i poprawy możliwości terapeutycznych w przyszłości. [Coarelli G. i in. 2018; Cui Z.T. i in 2024]

Bibliografia:

1. Klockgether T., Mariotti C., Paulson H.L., 2019. Spinocerebellar ataxia. *Nature Reviews Disease Primers*, 5(1): 24.
2. Cui Z.T., Mao Z.T., Yang R., Li J.J., Jia S.S., Zhao J.L., Zhong F.T., Yu P., Dong M., 2024. Spinocerebellar ataxias: from pathogenesis to recent therapeutic advances. *Frontiers in Neuroscience*, 18: 1422442.
3. Coarelli G., Brice A., Durr A., 2018. Recent advances in understanding dominant spinocerebellar ataxias from clinical and genetic points of view. *F1000Research*, 7: F1000 Faculty Rev-1781.
4. Sun Y.M., Lu C., Wu Z.Y., 2016. Spinocerebellar ataxia: relationship between phenotype and genotype – a review. *Clinical Genetics*, 90(4): 305-314.
5. Diallo A., Jacobi H., Tezenas du Montcel S., Klockgether T., 2021. Natural history of most common spinocerebellar ataxia: a systematic review and meta-analysis. *Journal of Neurology*, 268(8): 2749-2756.
6. Yap K.H., Azmin S., Che Hamzah J., Ahmad N., van de Warrenburg B., Mohamed Ibrahim N., 2022. Pharmacological and non-pharmacological management of spinocerebellar ataxia: a systematic review. *Journal of Neurology*, 269(5): 2315-2337.
7. Marchal-Muñoz A., García-Aranda M., Marchal-Muñoz M., Marchal-Escalona C., Redondo M., 2020. Effect of physical rehabilitation in patients with hereditary spinocerebellar ataxia: a systematic review. *Rehabilitación*, 54(3): 200-210.

8. ELEKTROSTYMULACJA W LECZENIU ODLEŻYN

Aleksandra Grzesiak, Patrycja Zychowicz, Łukasz Kwaśniak, Weronika Kwaśniak, Agata Grzesiak

Uniwersytet Jana Długosza

Collegium Medicum im. dr. W. Biegańskiego, Wydział Prawa i Ekonomii

Al. Armii Krajowej 13/15, 42-200 Częstochowa

E-mail: aleksandragrzesiak2003@wp.pl, patrycja_zychowicz@o2.pl,
kwasniakukasz@gmail.com, weronikak415@gmail.com, agataaagrzes@gmail.com

Wiktor Wojciechowski

Akademia WSB w Dąbrowie Górniczej

ul. Cieplaka 1C, 41-300 Dąbrowa Górnicza

E-mail: wiktorwojciechowski433@gmail.com

1. Wstęp

Odleżyny są częstym problemem u osób w stanie ciężkim, z urazami lub chorobami rdzenia kręgowego oraz u osób w podeszłym wieku. Bardzo ważne jest złożone leczenie. Istotne jest odciążenie miejsca narażonego na ucisk, odpowiednia pielęgnacja rany, opracowanie rany oraz kontrola i leczenie zakażenia, jeśli jest obecne. Trzeba również zadbać o właściwą dietę pacjenta. [Gould L.J., Alderden J., Aslam R., Barbul A., Bogie K.M., El Masry M., Graves L.Y., White-Chu E.F., Ahmed A., Boanca K., Brash J., Brooks K.R., Cockron W., Kennerly S.M., Livingston A.K., Page J., Stephens C., West V., Yap T.L., 2024]

Mimo standardowych metod leczenia część odleżyn ma charakter przewlekły i może nie wykazywać oczekiwanej poprawy pomimo leczenia. Z tego powodu badane są metody mające na celu wspomaganie procesu gojenia. Jedną z metod fizykalnych stosowanych jako rozszerzenie podstawowego leczenia jest elektrostymulacja (ES). Badane jest działanie na odleżyny różnych rodzajów prądów oraz różnych protokołów terapeutycznych. W literaturze szczególne znaczenie przypisuje się wysoko napięciowemu impulsowemu prądowi jednofazowemu (HVMPC). [Arora M., Harvey L.A., Glinsky J.V., Nier L., Lavrencic L., Kifley A., Cameron I.D., 2020; Chen L., Ruan Y., Ma Y., Ge L., Han L., 2023; Girgis B i Duarte J.A., 2018]

2. ES jako metoda wspomagająca leczenie odleżyn

U pacjenta w obrębie rany lub w jej bezpośrednim otoczeniu umieszczane są elektrody które wytwarzają bodziec elektryczny. Podczas ES w dostępnych badaniach stosowano między innymi prądy o różnej amplitudzie, częstotliwości i polaryzacji. Jedną z metod często przedstawionych w badaniach dotyczących odleżyn jest HVMPC. [Arora M. i in. 2020; Chen L. i in. 2023; Girgis B i Duarte J.A., 2018]

Skuteczność HVMPC w leczeniu odleżyn II-IV stopnia była oceniana w przeglądzie systematycznym i metaanalizie Girgis i Duarte. Analizowali oni również parametry

stosowanej elektrostymulacji oraz możliwość wskazania bardziej skutecznego protokołu terapeutycznego. [Girgis B i Duarte J.A., 2018]

HVMPC jako uzupełnienie standardowej pielęgnacji odleżyny został przeanalizowany w badaniach Polaka i wsp. Przykładowo, w randomizowanym badaniu dotyczącym katodowego HVMPC ES prowadzono przez 50 minut dziennie, pięć razy w tygodniu przez sześć tygodni. [Polak A., Kloth L.C., Blaszcak E., Taradaj J., Nawrat-Szoltysik A., Walczak A., Bialek L., Paczula M., Franek A., Kucio C., 2016]

W innym badaniu zastosowano katodowy HVMPC lub elektrostymulację katodowo-anodową przez 50 minut dziennie, pięć razy w tygodniu przez sześć tygodni. [Polak A., Kloth L.C., Blaszcak E., Taradaj J., Nawrat-Szoltysik A., Ickowicz T., Hordynska E., Franek A., Kucio C., 2017.]

Badania różnią się między sobą pod względem parametrów elektrostymulacji i sposobu stosowania elektrod. W badaniu z 2017 roku Polak i wsp. pisali, że protokół ES dla leczenia odleżyn nie został jeszcze jednoznacznie określony. Dlatego wyniki poszczególnych badań trzeba odnosić do zastosowanych w nich protokołów, a nie traktować różnych form ES jako identycznych metod leczenia. [Polak A. i in. 2017]

3. Skuteczność ES w leczeniu odleżyn

3.1. Wyniki przeglądów systematycznych

Jednym z ważniejszych źródeł dotyczących ES w leczeniu odleżyn jest przegląd opublikowany w 2020 roku Cochrane stworzony przez Arora i wsp. W tym przeglądzie porównano wyniki 20 randomizowanych badań obejmujących 913 uczestników. Autorzy ocenili, że ES prawdopodobnie zwiększa ilość odleżyn, które ulegają całkowitemu zagojeniu, oraz tempo ich gojenia. Dla prawdopodobieństwa całkowitego zagojenia uzyskano RR 1,99 (95% CI 1,39-2,85). [Arora M. i in. 2020]

W pracy wskazano również na ograniczenie dostępnych dowodów. Wpływ ES na czas do całkowitego zagojenia oceniono jako niepewny, podobnie jak wpływ terapii na zmniejszanie się powierzchni odleżyny. Autorzy uznali również, że dostępne dowody nie są wystarczające do poparcia powszechnego stosowania ES poza badaniami naukowymi. [Arora M. i in. 2020]

W nowszej analizie Chen i wsp. W ich przeglądzie systematycznym i metaanalizie uwzględniono 17 randomizowanych badań obejmujących 740 pacjentów. Metaanaliza ośmiu badań wykazała istotne zmniejszenie powierzchni odleżyny w grupach poddanych ES w porównaniu ze standardowym leczeniu rany lub pozorowaną ES. W dziewięciu badaniach wykazano większe prawdopodobieństwo zagojenia odleżyn w grupach poddanych ES w porównaniu z grupami kontrolnymi. [Chen L. i in. 2023]

Wyniki obu przeglądów wskazują na potencjalną skuteczność ES jako terapii wspomagającej leczenie odleżyn. Jednocześnie różnice w wynikach dotyczących poszczególnych punktów końcowych oraz różnice w protokołach powodują, że wnioski należy interpretować ostrożnie. [Arora M. i in. 2020; Chen L. i in. 2023]

3.2. Wyniki badań randomizowanych

Badanie Polak i wsp. obejmowało 49 pacjentów z odleżynami II i III stopnia.

Wcześniejsze podstawowe postępowanie lecznicze odleżyn u pacjentów nie przyniosło oczekiwanej poprawy. Uczestników podzielono losowo na dwie grupy. W grupie badanej stosowano katodowy HVMPC jako uzupełnienie standardowej pielęgnacji rany. Grupa druga była kontrolną, u pacjentów stosowano podstawowe postępowanie lecznicze oraz stymulację pozorowaną. ES prowadzono przez 50 minut dziennie, pięć razy w tygodniu przez sześć tygodni. Po sześciu tygodniach procentowa redukcja powierzchni rany wynosiła $80,31 \pm 29,02\%$ w grupie ES oraz $54,65 \pm 42,65\%$ w grupie kontrolnej. Różnica pomiędzy tymi wynikami była istotna statystycznie. [Polak A. i in. 2016]

Kolejne badanie Polak i wsp obejmowało 63 pacjentów z odleżynami kategorii II-IV. Porównywano w nim działanie katodowego HVMPC, katodowo-anodowego HVMPC oraz pozorną ES. Uczestników leczono standardową pielęgnacją rany oraz 50 minut dziennie, 5 razy w tygodniu, przez sześć tygodni ES. Powierzchnia ran w grupie kontrolnej zmniejszyła się o 40,53% natomiast w grupach HVMPC odpowiednio, katodowej 82,34% i katodowo-anodowej 70,77%. Nie stwierdzono istotnej różnicy między grupą katodową HVMPC, a katodowo-anodową HVMPC. Obie aktywne metody ES prowadziły do większego zmniejszenia powierzchni odleżyny. [Polak A. i in. 2017]

Wyniki te wskazują, że zarówno katodowy jak i katodowo-anodowy HVMPC wraz z podstawową pielęgnacją rany mogą przyczynić się do większego zmniejszenia powierzchni odleżyny. Nie pozwalają nam jednak stwierdzić, że jeden z tych protokołów jest zdecydowanie lepszy od drugiego. [Polak A. i in. 2016; 2017]

3.3 Porównanie ES z ultradźwiękami

Polak i wsp. przeprowadzili również randomizowane badanie porównujące standardową pielęgnację ran, standardową pielęgnację ran z HVMPC oraz standardową pielęgnację ran z dodatkiem ultradźwięków. Praca obejmowała 77 pacjentów oraz 88 odleżyn kategorii II-IV. Po sześciu tygodniach średnia procentowa redukcja powierzchni odleżyn wyniosła $77,48 \pm 11,59\%$ w grupie ultradźwięków, $76,19 \pm 32,83\%$ w grupie HVMPC oraz $48,97 \pm 53,42\%$ w grupie kontrolnej. Zarówno ultradźwięki, jak i elektrostymulacja powodowały istotnie większą redukcję powierzchni ran niż standardowa pielęgnacja. Nie stwierdzono natomiast istotnej różnicy pomiędzy grupą ultradźwięków i grupą HVMPC. Na podstawie tego badania można stwierdzić, że obie metody mogą być skutecznymi terapiami wspomagającymi zmniejszenie powierzchni odleżyn. Badanie nie wykazało wyższości HVMPC nad ultradźwiękami. [Polak A., Taradaj J., Nawrat-Szoltysik A., Stania M., Dolibog P., Blaszcak E., Zarzeczny R., Juras G., Franek A., Kucio C., 2016]

3.4. Polaryzacja ES i przepływ krwi

Istotnym zagadnieniem jest również sposób zastosowania polaryzacji. Polak i wsp. przeprowadzili randomizowane badanie u osób z urazami neurologicznymi, w którym porównano ES anodową, katodową oraz placebo. Oceniano między innymi przepływ krwi w skórze około ranny oraz zmianę powierzchni odleżyn. Po ośmiu tygodniach redukcja powierzchni ran wyniosła $64,10 \pm 29,22\%$ w grupie anodowej, $74,06 \pm 23,23\%$ w grupie katodowej oraz $41,42 \pm 27,88\%$ w grupie placebo. Redukcja powierzchni ran w obu grupach

ES była istotnie większa niż w grupie placebo. Autorzy zaobserwowali również poprawę przepływu krwi w skórze około rany w grupach ES. W obu grupach stwierdzono związek pomiędzy zmianami przepływu krwi, a redukcją powierzchni rany. Wyniki te wskazują na możliwy związek między zmianami przepływu krwi, a procesem gojenia, jednak nie pozwalają na stwierdzenie, że poprawa przepływu krwi jest bezpośrednią przyczyną szybszego gojenia. [Polak A., Kucio C., Kloth L.C., Paczula M., Hordynska E., Ickowicz T., Blaszcak E., Kucio E., Oleszczyk K., Ficek K., Franek A., 2018]

4. Bezpieczeństwo i ograniczenia

Dostępne dane wskazują, że ES jest zazwyczaj dobrze tolerowana. Działania niepożądane były na ogół rzadkie i miały łagodny charakter. W przeglądzie Cochrane opisywano między innymi zaczerwienienie skóry oraz dyskomfort. Jednak pewność dowodów dotyczących działań niepożądanych była ograniczona. Chen i wsp. również wskazali, że działania niepożądane były rzadkie i miały zazwyczaj łagodny charakter. [Arora M. i in. 2020; Chen L. i in. 2023]

Interpretacja wyników badań dotyczących skuteczności ES wymaga uwzględnienia ich heterogeniczności. Poszczególne badania różniły się między innymi rodzajem ES, parametrami prądu, czasem trwania terapii, częstością zabiegów, polaryzacją elektrod oraz charakterystyką pacjentów i ran. [Arora M. i in. 2020; Chen L. i in. 2023; Girgis B i Duarte J.A., 2018; Polak A. i in. 2017]

Istotnym ograniczeniem jest również stosunkowo niewielka liczebność części badań randomizowanych. Ponadto ES była stosowana jako uzupełnienie standardowej pielęgnacji ran, dlatego wyników nie należy interpretować jako dowodu, że może ona zastąpić podstawowe elementy leczenia odleżyn. [Arora M. i in. 2020; Chen L. i in. 2023; Gould L.J. i in. 2024]

5. Znaczenie kliniczne

Wytyczne Wound Healing Society z aktualizacją z 2023 roku wskazują, że ES stosowana razem z konwencjonalnym leczeniem może być przydatna w terapii przewlekłych odleżyn kategorii II-IV. W wytycznych szczególną uwagę zwrócono na HVMPC, wskazując na jego potencjalny wpływ na zmniejszenie powierzchni rany i zwiększenie prawdopodobieństwa całkowitego zagojenia. Należy jednak podkreślić, że ES jest traktowana jako metoda wspomagająca, a nie zamiennik standardowego leczenia. [Gould L.J. i in. 2024]

6. Wnioski

Dostępne dane naukowe wskazują, że ES może stanowić wartościową metodę wspomagającą leczenie odleżyn. Przegląd Cochrane wykazał prawdopodobny korzystny wpływ ES na odsetek całkowicie zagojonych odleżyn oraz tempo ich gojenia, przy jednoczesnej niepewności dotyczącej jej wpływu na powierzchnię rany. [Arora M. i in. 2020]

Nowsza metaanaliza Chen i wsp. wykazała natomiast istotną redukcję powierzchni odleżyn oraz większe prawdopodobieństwo całkowitego zagojenia w grupach poddanych ES. [Chen L. i in. 2023]

Szczególnie dobrze przebadaną formą ES jest HVMPC. Randomizowane badania Polaka i wsp. wykazały większą redukcję powierzchni odleżyn po zastosowaniu katodowego

HVMPC w porównaniu z placebo oraz korzystne wyniki zarówno dla katodowego, jak i katodowo-anodowego HVMPC. [Polak A. i in. 2016; 2017]

Badanie porównujące HVMPC z ultradźwiękami wykazało skuteczność obu metod w porównaniu ze standardową pielęgnacją, bez istotnej różnicy między HVMPC i ultradźwiękami. [Polak A. i in. 2016]

U osób z urazami neurologicznymi zarówno ES anodowa, jak i katodowa wiązały się z większą redukcją powierzchni odleżyn niż placebo oraz ze zmianami przepływu krwi w skórze okołoranowej. [Polak A. i in. 2018]

Pomimo obiecujących wyników, dostępne badania są zróżnicowane pod względem populacji, parametrów ES i sposobu oceny gojenia. Dlatego elektrostymulację należy obecnie traktować jako terapię uzupełniającą standardowe leczenie odleżyn, a dalsze badania powinny koncentrować się między innymi na określeniu optymalnych parametrów i protokołów leczenia. [Arora M. i in. 2020; Chen L. i in. 2023; Girgis B i Duarte J.A., 2018; Gould L.J. i in. 2024]

Bibliografia:

1. Arora M., Harvey L.A., Glinsky J.V., Nier L., Lavrencic L., Kifley A., Cameron I.D., 2020. Electrical stimulation for treating pressure ulcers. *Cochrane Database of Systematic Reviews*, 1: CD012196.
2. Chen L., Ruan Y., Ma Y., Ge L., Han L., 2023. Effectiveness and safety of electrical stimulation for treating pressure ulcers: a systematic review and meta-analysis. *International Journal of Nursing Practice*, 29(2): e13041.
3. Girgis B., Duarte J.A., 2018. High Voltage Monophasic Pulsed Current (HVMPC) for stage II-IV pressure ulcer healing. A systematic review and meta-analysis. *Journal of Tissue Viability*, 27(4): 274-284.
4. Gould L.J., Alderden J., Aslam R., Barbul A., Bogie K.M., El Masry M., Graves L.Y., White-Chu E.F., Ahmed A., Boanca K., Brash J., Brooks K.R., Cockron W., Kennerly S.M., Livingston A.K., Page J., Stephens C., West V., Yap T.L., 2024. WHS guidelines for the treatment of pressure ulcers-2023 update. *Wound Repair and Regeneration*, 32(1): 6-33.
5. Polak A., Kloth L.C., Blaszcak E., Taradaj J., Nawrat-Szoltysik A., Walczak A., Bialek L., Paczula M., Franek A., Kucio C., 2016. Evaluation of the healing progress of pressure ulcers treated with cathodal high-voltage monophasic pulsed current: results of a prospective, double-blind, randomized clinical trial. *Advances in Skin & Wound Care*, 29(10): 447-459.
6. Polak A., Kloth L.C., Blaszcak E., Taradaj J., Nawrat-Szoltysik A., Ickowicz T., Hordynska E., Franek A., Kucio C., 2017. The efficacy of pressure ulcer treatment with cathodal and cathodal-anodal high-voltage monophasic pulsed current: a prospective, randomized, controlled clinical trial. *Physical Therapy*, 97(8): 777-789.
7. Polak A., Taradaj J., Nawrat-Szoltysik A., Stania M., Dolibog P., Blaszcak E., Zarzeczny R., Juras G., Franek A., Kucio C., 2016. Reduction of pressure ulcer size with high-voltage pulsed current and high-frequency ultrasound: a randomised trial. *Journal of Wound Care*, 25(12): 742-754.

8. Polak A., Kucio C., Kloth L.C., Paczula M., Hordynska E., Ickowicz T., Blaszcak E., Kucio E., Oleszczyk K., Ficek K., Franek A., 2018. A randomized, controlled clinical study to assess the effect of anodal and cathodal electrical stimulation on periwound skin blood flow and pressure ulcer size reduction in persons with neurological injuries. *Ostomy Wound Management*, 64(2): 10-29.

9. WPŁYW PRZEBYCIA COVID-19 NA RYZYKO ROZWOJU NOWO ROZPOZNANEJ CUKRZYCY

Patrycja Zychowicz, Aleksandra Grzesiak, Łukasz Kwaśniak, Weronika Kwaśniak, Agata Grzesiak

Uniwersytet Jana Długosza

Collegium Medicum im. dr. W. Biegańskiego, Wydział Prawa i Ekonomii

Al. Armii Krajowej 13/15, 42-200 Częstochowa

E-mail: patrycja_zychowicz@o2.pl, aleksandrgrzesiak2003@wp.pl,
kwasniakukasz@gmail.com, weronikak415@gmail.com, agataaagrzses@gmail.com

Wiktor Wojciechowski

Akademia WSB w Dąbrowie Górniczej

ul. Cieplaka 1C, 41-300 Dąbrowa Górnicza

E-mail: wiktorkojciechowski433@gmail.com

Abstrakt: Pandemia COVID-19 ujawniła dwukierunkową zależność między zakażeniem SARS-CoV-2 a homeostazą glukozy. Początkowo koncentrowano się na cukrzycy jako czynniku ryzyka ciężkiego przebiegu COVID-19, jednak późniejsze badania wykazały zwiększoną częstość rozpoznania nowej cukrzycy (*new-onset diabetes*) u osób po przebyciu zakażenia. Celem pracy była synteza aktualnych danych dotyczących epidemiologii, mechanizmów patofizjologicznych oraz czynników wpływających na rozwój zaburzeń gospodarki węglowodanowej po COVID-19. Wieloośrodkowe badania kohortowe i metaanalizy wskazują na zwiększenie względnego ryzyka wystąpienia cukrzycy po COVID-19, szczególnie cukrzycy typu 2. Ryzyko wykazuje zależność od ciężkości ostrej fazy zakażenia: jest umiarkowanie zwiększone u osób leczonych ambulatoryjnie, natomiast wyraźnie wyższe u pacjentów hospitalizowanych oraz wymagających leczenia na oddziale intensywnej terapii. W populacji pediatrycznej obserwowany wzrost rozpoznania cukrzycy typu 1 może być związany z przyspieszeniem klinicznej manifestacji wcześniej istniejącego procesu chorobowego, bez jednoznacznych dowodów na indukowanie autoagresji *de novo* przez SARS-CoV-2. Patogeneza zaburzeń jest wieloczynnikowa i obejmuje obwodową insulinooporność związaną ze stanem zapalnym, dysfunkcję tkanki tłuszczowej, zaburzenia osi renina-angiotensyna-aldosteron oraz czynnościowe upośledzenie komórek β trzustki. Dostępne dane nie potwierdzają, aby masowa bezpośrednia destrukcja komórek β była dominującym mechanizmem. Istotną rolę odgrywają również hiperglikemia stresowa, steroidoterapia oraz ujawnienie wcześniej istniejących zaburzeń metabolicznych.

1. Wstęp

Od początku globalnego rozprzestrzeniania się wirusa SARS-CoV-2 zaburzenia metaboliczne glukozy znalazły się w centrum zainteresowania medycyny klinicznej. Początkowo cukrzycę traktowano jako niezależny czynnik ryzyka ciężkiego przebiegu COVID-19, niewydolności oddechowej oraz zgonu. [1, 2]. W miarę upływu pandemii pojawiły się dane wskazujące, że zależność między SARS-CoV-2 a metabolizmem glukozy może być dwukierunkowa. Przebiecie ostrej fazy COVID-19 predysponuje do rozwoju

zaburzeń tolerancji glukozy oraz jawnej klinicznie, nowo rozpoznanej cukrzycy (*new-onset diabetes*) [3-5].

Zagadnienie to stało się jednym z kluczowych wyzwań w ramach wielonarządowego zespołu post-COVID-19 [3, 14]. Prawidłowa interpretacja kliniczna wymaga jednak precyzyjnego i krytycznego rozgraniczenia czterech odrębnych jednostek zjawiskowych:

1. Ostrej, przemijającej hiperglikemii stresowej: Związanej z gwałtowną aktywacją osi podwzgórze–przysadka–nadnercza (HPA), wyrzutem katecholamin, kortyzolu oraz działaniem uogólnionego odczynu zapalnego [4, 5].
2. Jatrogennej dysglikemii postteroidowej: Wynikającej z rutynowego podawania syntetycznych glikokortykosteroidów (np. deksametazonu) w terapii hipoksemii [25, 26].
3. Demaskowania utajonych zaburzeń metabolicznych: Przyspieszenia ujawnienia istniejącej przed zakażeniem, lecz niezdiagnozowanej cukrzycy typu 2 lub progresji zaawansowanego stanu przedcukrzycowego na skutek stresu ustrojowego [4, 27].
4. Trwałej cukrzycy indukowanej wirusowo: Rozwijającej się *de novo* wskutek specyficznego, wielotorowego uszkodzenia szlaków metabolicznych i wydzielniczych przez SARS-CoV-2 [4, 18].

2. Epidemiologia

Wielkoskalowe analizy epidemiologiczne oparte na wielomilionowych bazach danych jednoznacznie dokumentują powtarzalny, statystycznie istotny wzrost częstości rozpoznania cukrzycy u osób po przebiegu COVID-19.

Zhang i wsp. w systematycznym przeglądzie i metaanalizie obejmującej dziewięć badań wykazali zwiększone ryzyko nowo rozpoznanej cukrzycy po COVID-19. Łączna częstość występowania wynosiła 15,53 przypadku na 1000 osobolat, a ryzyko było większe niż w populacjach kontrolnych [7]. Spójne oszacowania przedstawił zespół Lai i wsp. w analizie 11 badań kohortowych obejmującej 47,1 mln pacjentów [8] oraz Ssentongo i wsp. w analizie ponad 47,5 mln osób (4,27 mln po COVID-19 oraz 43,2 mln kontroli)[10]. Metaanaliza Zhou i wsp. Z 2024, syntetyzująca dane z 20 badań kohortowych z udziałem ponad 60 milionów osób, wykazała łączny skorygowany wskaźnik HR (*hazard ratio*) 1,46 (95% CI: 1,38-1,55). Dla cukrzycy typu 1 HR wynosił 1,44 (95% CI: 1,13-1,82), natomiast dla cukrzycy typu 2-1,47 (95% CI: 1,36-1,59) [11]. Co istotne, ryzyko było zależne od ciężkości zakażenia: HR wynosił 1,16 (95% CI: 1,07-1,26) u osób niehospitalizowanych, 2,15 (95% CI: 1,33-3,49) u osób hospitalizowanych oraz 2,88 (95% CI: 1,73-4,79) u osób wymagających intensywnej terapii[11]. Z kolei metaanaliza Cocking i wsp. z 2025 roku (12 badań, >48 mln osób) potwierdziła podwyższone ryzyko o 41%. [12] W 2026 r. Lawal i wsp. przeprowadzili kolejną metaanalizę obejmującą 16 badań. Łączny RR (*Risk Ratio*) wyniósł 1,41 (95% CI: 1,38-1,44). Jednocześnie autorzy wykazali podwyższone wartości HbA1c oraz wskaźnika oporności HOMA-IR u osób po COVID-19[23].

Jednym z najbardziej wpływowych badań pozostaje analiza Xie i Al-Aly obejmująca 181 280 osób po COVID-19 oraz ponad 8 mln osób kontrolnych. Po 12 miesiącach obserwacji ryzyko rozwoju cukrzycy było zwiększone: HR 1,40 (95% CI: 1,36-1,44). Autorzy oszacowali nadmiar zachorowań na 13,46 przypadków na 1000 osób rocznie [3]. Badanie OpenSAFELY wykazało szczególnie wysokie ryzyko we wczesnym okresie po

infekcji. W ciągu 4–12 tygodni po COVID-19 IRR wynosił 1,81 (95% CI: 1,51-2,19), a następnie zmniejszał się w kolejnych miesiącach [5]. W kanadyjskiej kohorcie Naveed i wsp. obejmującej 629 935 osób HR dla nowo rozpoznanej cukrzycy wynosił 1,17 (95% CI: 1,06-1,28). U pacjentów hospitalizowanych był jednak znacznie wyższy i wynosił 2,21 (95% CI: 1,57-3,13) [6].

2.1. Wariant Omikron i stan uodpornienia

Wielkoskalowe badanie populacyjne z Australii (Qian i wsp., 2026), analizujące 5 736 501 dobranych par w erze dominacji wariantu Omikron (przy medianie obserwacji 200 dni), wykazało istotnie niższy przyrost częstości włączania leczenia przeciwcukrzycowego. Autorzy wykazali jednak zbliżony wzrost ryzyka dla negatywnych punktów kontrolnych, co dowodzi, że w populacjach zaszczepionych i o wysokiej odporności hybrydowej rzeczywisty bezpośredni efekt biologiczny wirusa może być bliski zeru, a obserwowana nadwyżka wynika w dużej mierze z resztkowego zakłócenia i błędu detekcji [16].

3. Cukrzyca typu 2 a cukrzyca typu 1

3.1. Cukrzyca typu 2 (T2D)

Dominująca większość rozpoznań po COVID-19 dotyczy cukrzycy typu 2. W badaniu Rathmanna i wsp. w Niemczech częstość nowo rozpoznanej T2D wynosiła 15,8 na 1000 osobolat po COVID-19 oraz 12,3 na 1000 osobolat po innych ostrych infekcjach dróg oddechowych, co odpowiadało IRR 1,28 (95% CI: 1,05-1,57)- przy czym z badania wykluczono pacjentów stosujących steroidy w ciągu 30 dni [13]. COVID-19 stanowi w tym fenotypie silny przyspieszacz dekompensacji metabolicznej u pacjentów ze zmniejszoną wyjściową wrażliwością na insulinę [4, 27].

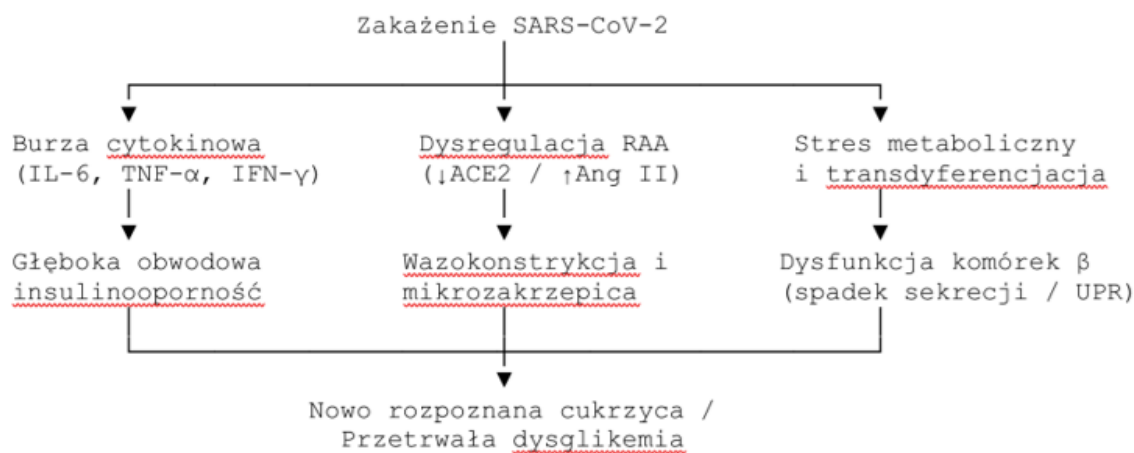
3.2. Cukrzyca typu 1 (T1D)

Zagadnienie indukcji cukrzycy autoimmunologicznej budziło liczne kontrowersje. Raport amerykańskiego CDC (Barrett i wsp.) wskazał na istotny wzrost zachorowań na nową cukrzycę u pacjentów pediatrycznych po COVID-19 oraz częstsze występowanie ciężkiej kwasicy ketonowej (DKA) jako pierwszej manifestacji [9, 10]. W Finlandii obserwowano wzrost zapadalności na T1D z 2,89 do 9,35 na 100 000 osobolat [5].

Jednakże badania prospektywne nad autoimmunizacją (np. program TEDDY oceniający autoprzeciwciała anty-GAD, IA-2, ZnT8) nie potwierdziły, aby łagodne lub bezobjawowe zakażenie SARS-CoV-2 przyspieszało pojawianie się przeciwciał skierowanych przeciwko trzustce [11]. Podobnie w badaniu Gojdy i wsp. żaden z pacjentów z poinfekcyjną dysglikemią nie posiadał przeciwciał przeciwwyspowych [9]. Wskazuje to, że SARS-CoV-2 nie indukuje procesu autoagresji *de novo*, lecz działa jako nieswoisty wyzwalacz metaboliczny, przyspieszając kliniczne ujawnienie T1D u dzieci ze zredukowaną wcześniej masą komórek beta [15, 17].

4. Patofizjologia zaburzeń metabolicznych

Złożona patogenez dysglikemii w COVID-19 opiera się na sprzężeniu procesów immunologicznych, naczyniowych oraz endokrynnych.



Rycina 1. Mechanizmy patofizjologiczne rozwoju nowo rozpoznanej cukrzycy i przetrwiałej dysglikemii w przebiegu oraz po przebyciu COVID-19 [4, 21, 25, 32, 34, 35]

4.1. Systemowy stan zapalny i obwodowa insulinooporność

Ostra faza COVID-19 charakteryzuje się masywnym uwalnianiem mediatorów prozapalnych (IL-6, TNF- α , IL-1 β , INF- γ) [4, 11]. Cytokiny te stymulują wewnątrzkomórkowe kinazy serynowo-treoninowe oraz białka SOCS-3, które hamują przekazywanie sygnału przez receptor insulinowy poprzez fosforylację reszt serynowych białka IRS-1. Prowadzi to do zablokowania translokacji transporterów GLUT4 do błony komórkowej w mięśniach szkieletowych oraz nasilenia wątrobowej glukoneogenezy [13, 35].

W badaniach klinicznych insulinooporność mierzona wskaźnikiem HOMA-IR występowała u 57,7% pacjentów z ciężkim przebiegiem zakażenia (wobec 34,5% u osób bez COVID-19 i bez cukrzycy) [19]. Montefusco i wsp. przy użyciu kłamry euglikemiczno-hiperinsulinemicznej udowodnili, że stan głębokiego hiperinsulinizmu z obwodową insulinoopornością może utrzymywać się u części chorych co najmniej przez 6 miesięcy po hospitalizacji [17].

4.2. Uszkodzenie tkanki tłuszczowej

SARS-CoV-2 wykazuje tropizm do tkanki tłuszczowej, zakażając adipocyty i makrofagi zrębowe. Wywołuje to stan zapalny (adipositis), charakteryzujący się spadkiem stężenia ochronnej adiponektyny oraz nadmiernym uwalnianiem wolnych kwasów tłuszczowych (FFA), rezystyny i leptyny [13, 34]. Nadmiar krążących FFA prowadzi do lipotoksyczności w komórkach wątroby i mięśni, utrwalając szlaki oporności na insulinę [13, 17].

4.3. Oś RAA, zapalenie śródbłonna i mikrozakrzepica

Wniknięcie wirusa do komórek za pośrednictwem enzymu konwertującego angiotensynę 2 (ACE2) powoduje jego internalizację i spadek ekspresji powierzchniowej [12, 14]. Utrata aktywności ACE2 uniemożliwia konwersję angiotensyny II do angiotensyny-(1-7). Nadmiar Ang II za pośrednictwem receptora AT1 wywołuje skurcz naczyń, stres oksydacyjny oraz stymulację procesów prozwłóknieniowych w wyspach trzustkowych [12, 31]. Jednoczesne zapalenie komórek śródbłonna naczyń (endotheliitis) oraz

mikrozakrzepica prowadzą do hipoksji i ogniskowego niedokrwienia mikrokrążenia wyspowego trzustki [15].

4.4. Bezpośrednie oddziaływanie na komórki β

Początkowe doniesienia eksperymentalne z 2020–2021 roku sugerowały bezpośrednią infekcję, replikację wirusa w komórkach β oraz ich masową apoptozę [6, 7, 18]. Jednak późniejsze, analizy histopatologiczne doprowadziły jednak do bardziej złożonej interpretacji. Coate i wsp. wykazali, że czynniki wejścia wirusa ACE2 i TMPRSS2 są obecne w mikrokrążeniu oraz przewodach trzustki i nie są wzbogacone w komórkach β [20]. Nie oznacza to całkowitego wykluczenia możliwości oddziaływania wirusa na trzustkę, ale osłabia hipotezę, według której masowa bezpośrednia liza komórek β jest głównym mechanizmem rozwoju cukrzycy [8]. Istnieją natomiast dane eksperymentalne sugerujące możliwość zaburzenia fenotypu komórek β , stresu retikulum endoplazmatycznego i zmian w ekspresji markerów różnicowania [21]. W warunkach silnego stresu zapalnego komórki β ulegają zjawisku odróżnicowania i transdiferencjacji, czyli tracą markery dojrzałości (PDX1, MAFA, INS) i zaczynają wykazywać ekspresję markerów innych linii, np. glukagonu (GCG) lub keratyny 19 (KRT19). Obciążenie metaboliczne aktywuje natomiast szlak odpowiedzi na niesfaldowane białka (UPR), prowadząc do czynnościowego zahamowania pulsacyjnego wydzielania insuliny [20, 21].

4.5. Insulinooporność a defekt wydzielniczy komórek β

W kluczowym prospektywnym badaniu metabolicznym Gojdy i wsp. u chorych z ciężkim COVID-19 wskaźnik wrażliwości insulinowej Matsudy w ostrej fazie był obniżony w równym stopniu u chorych z jak i bez hiperglikemii. Natomiast odpowiedź kompensacyjna komórek β , mierzona indeksem dyspozycji, była u pacjentów z hiperglikemią drastycznie upośledzona. Dowodzi to, że hiperglikemia w przebiegu ostrej infekcji ujawnia się u tych pacjentów, u których rezerwa wydzielnicza komórek β jest niewystarczająca do pokrycia zwiększonego zapotrzebowania wywołanego ostrą insulinoopornością [9].

5. Czynniki ryzyka i zależność od ciężkości przebiegu

Zależność pomiędzy stopniem ciężkości ostrej fazy COVID-19 a ryzykiem późniejszego rozpoznania cukrzycy wykazuje wyraźny charakter dawka-odpowiedź. [11]

Tabela 1. Ryzyko według ciężkości COVID-19[11]

Przebieg COVID-19	Przybliżone HR
Niehospitalizowany	1,16
Hospitalizowany	2,15
Wymagający intensywnej terapii	2,88

Zestawienie czynników ryzyka rozwoju cukrzycy po COVID-19

1. Ciężkość ostrej fazy: Najsilniejszy predyktor; u chorych na OIT ryzyko wzrasta blisko czterokrotnie w stosunku do osób nienarażonych [3, 4, 11].
2. Wiek: Pacjenci w wieku powyżej 65 lat charakteryzują się najwyższym bezwzględnym przyrostem zachorowań [1, 4, 7].
3. Masa ciała: Otyłość (BMI powyżej 30) podwaja ryzyko utrwalenia zaburzeń [5, 20, 27].
4. Wcześniejszy stan przedcukrzycowy (*prediabetes*): W kohorcie 42 877 chorych z prediabetes hospitalizacja z powodu COVID-19 skutkowała rozpoznaniem cukrzycy w trakcie pobytu u 21,9% osób (wobec 6,02% w kontroli), a po 5 miesiącach utrwalona choroba występowała u 14,75% (wobec 7,51%) [25].
5. Markery laboratoryjne ostrej fazy: Skrajnie wysokie stężenia białka C-reaktywnego (CRP powyżej 26), ferrytyny oraz D-dimerów korelują z przetrwałym uszkodzeniem metabolicznym [16, 22].
6. Czynniki etniczne: Badanie PHOSP-COVID wykazało istotnie wyższe ryzyko w populacjach południowoazjatyckich i czarnoskórych w porównaniu z rasą białą [24].

6. Wpływ terapii glikokortykosteroidami

Wprowadzenie deksametazonu (w dawce 6 mg/dobę przez 10 dni) do standardu postępowania w hipoksemii znacząco obniżyło śmiertelność, lecz wpłynęło na profil glikemiczny hospitalizowanych [25]. Glikokortykosteroidy nasilają wątrobową ekspresję enzymów glukoneogenezy (PEPCK, G6Paza), zmniejszają obwodowy wychwyt glukozy o 30-50% i hamują pulsacyjne wydzielanie insuliny [25, 26]. W analizach klinicznych stosowanie sterydów wiązało się z częstszym występowaniem ostrej hiperglikemii [16, 26]. Jednak rygorystyczne modele wieloczynnikowe wykazały, że po skorygowaniu o zastosowanie deksametazonu podwyższone ryzyko cukrzycy w obserwacji długoterminowej pozostaje istotne statystycznie. Ponadto w kohorcie PHOSP-COVID po uwzględnieniu ciężkości choroby steroidoterapia nie stanowiła niezależnego predyktora utrwalonej cukrzycy po 12 miesiącach [24]. Steroidy należy zatem uznawać za silny wyzwalacz demaskujący przejściową hiperglikemię, lecz nie za wyłączną przyczynę odległych zaburzeń metabolicznych [9, 27].

7. Hiperglikemia stresowa a rzeczywista cukrzyca

W ostrej fazie infekcji kluczowe znaczenie ma laboratoryjne różnicowanie hiperglikemii stresowej od wcześniej istniejącej cukrzycy.

Tabela 2. Zmiany parametrów laboratoryjnych w ostrej fazie COVID-19 oraz ich interpretacja kliniczna

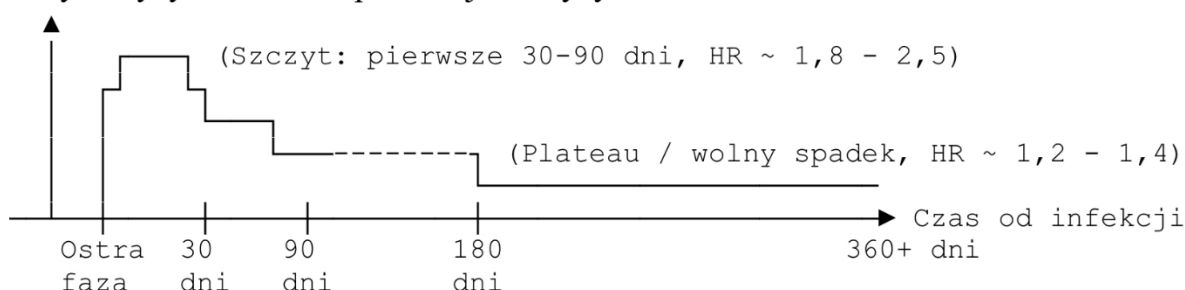
Parametr	Zmiana w COVID-19	Interpretacja i znaczenie kliniczne
Glikemia na czczo (FPG)	Znaczący wzrost (>126 mg/dl / >7,0 mmol/l) [27]	Odwierciedla ostry stres metaboliczny, wyrzut katecholamin i kortyzolu oraz działanie cytokin [4, 27].
HbA1c przy przyjęciu	Prawidłowa (<5,7%) lub w przedziale 5,7–6,4% [22, 27]	Kluczowy marker: HbA1c $\geq 6,5\%$ dowodzi obecności nierozpoznanej cukrzycy przed

		zakażeniem [22].
Peptyd C	Zmienny: podwyższony lub obniżony [21, 28]	Pozwala ocenić rezerwę wydzielniczą komórek β i różnicować defekt sekrecji z insulinopornością [28].
Profil lipidowy	Wzrost triglicerydów, obniżenie HDL-C [28]	Wskaźnik dysfunkcji metabolicznej tkanki tłuszczowej i nasilonej lipotoksyczności [21, 28].

Nowo rozpoznana hiperglikemia w ostrej fazie stanowi silny negatywny czynnik rokowniczy, pacjenci ci charakteryzują się blisko 10-krotnie wyższą śmiertelnością wewnątrzzpitalną w zestawieniu z osobami w normoglikemii [1, 22].

7.1. Dynamika czasowa zaburzeń glikemii

Krzywa ryzyka nowo rozpoznanej cukrzycy w czasie



Rycina 2. Dynamika czasowa ryzyka względnego (HR) rozpoznania nowej cukrzycy po przebiegu zakażenia SARS-CoV-2 [5, 28]

7.2. Trwałość zaburzeń

W badaniu Cromer i wsp. oceniono losy pacjentów hospitalizowanych z nową hiperglikemią: u 40-50% doszło do pełnej normalizacji glikemii w ciągu 6-12 miesięcy, podczas gdy u 50-60% doszło do utrwalenia cukrzycy wymagającej stałej farmakoterapii [27]. W kohorcie PHOSP-COVID 6,9% osób rozwinęło $HbA_{1c} \geq 6,5\%$ po 5 miesiącach, z czego u 73% stan ten utrzymywał się po roku [24]. U części pacjentów zjawisko ma więc charakter w pełni odwracalny, a u pozostałych stanowi trwałą patologię.

8. Wnioski

Przebieg COVID-19 wiąże się ze zwiększonym ryzykiem nowo rozpoznanej cukrzycy, szczególnie cukrzycy typu 2, przy czym ryzyko to wzrasta wraz z ciężkością ostrej fazy zakażenia i jest najwyższe u pacjentów wymagających hospitalizacji oraz leczenia na oddziale intensywnej terapii. W przypadku cukrzycy typu 1 u dzieci obserwowany wzrost liczby rozpoznań wydaje się być związany z przyspieszeniem klinicznej manifestacji zaburzeń metabolicznych w stadium przedklinicznym, a nie z bezpośrednim indukowaniem autoagresji przez SARS-CoV-2.

Patogeneza zaburzeń gospodarki węglowodanowej po COVID-19 jest wieloczynnikowa i obejmuje nasilone zjawisko insulinoporności, uogólniony stan zapalny, dysfunkcję tkanki tłuszczowej, zaburzenia osi renina-angiotensyna-aldosteron oraz czynnościowe upośledzenie komórek β trzustki. Bezpośrednie lityczne niszczenie komórek

β przez SARS-CoV-2 nie wydaje się natomiast dominującym mechanizmem rozwoju cukrzycy. Istotne znaczenie mają również hiperglikemia stresowa oraz działanie glikokortykosteroidów, które mogą ujawniać wcześniej istniejące, nierozpoznane zaburzenia metaboliczne.

Zaburzenia glikemii po przebiegu COVID-19 nie zawsze mają charakter trwały. U części pacjentów ulegają one normalizacji w okresie 6-12 miesięcy, natomiast u pozostałych dochodzi do utrwalenia zaburzeń metabolicznych lub ujawnienia wcześniej istniejącego stanu przedcukrzycowego bądź cukrzycy. Z tego względu rozpoznanie cukrzycy wyłącznie na podstawie hiperglikemii występującej podczas ostrej infekcji powinno być interpretowane z ostrożnością i wymagać ponownej oceny po ustąpieniu ostrego stanu chorobowego.

Z klinicznego punktu widzenia szczególnego monitorowania wymagają osoby po ciężkim przebiegu COVID-19 oraz pacjenci z czynnikami ryzyka metabolicznego, zwłaszcza z otyłością, stanem przedcukrzycowym lub przebytą steroidoterapią. Ocena gospodarki węglowodanowej, obejmująca glikemię i HbA_{1c}, pozwala na wcześniejsze wykrycie utrwalonych zaburzeń i właściwe różnicowanie hiperglikemii stresowej od wcześniej istniejącej lub nowo ujawnionej cukrzycy. Dostępne dowody wskazują zatem, że COVID-19 może stanowić istotny czynnik sprzyjający ujawnieniu lub progresji zaburzeń gospodarki węglowodanowej, jednak zależność ta powinna być interpretowana z uwzględnieniem ciężkości zakażenia, wyjściowego ryzyka metabolicznego oraz ograniczeń badań obserwacyjnych.

Bibliografia:

1. Apicella M, Campaniello MC, Mantuano M, Mazoni L, Coppelli A, Del Prato S. COVID-19 in people with diabetes: understanding the reasons for worse outcomes. *Lancet Diabetes Endocrinol.* 2020;8(9):782-792. doi:10.1016/S2213-8587(20)30238-2. PMID: 32687793.
2. Bornstein SR, Rubino F, Khunti K, Mingrone G, Hopkins D, Birkenfeld AL, et al. Practical recommendations for the management of diabetes in patients with COVID-19. *Lancet Diabetes Endocrinol.* 2020;8(6):546-550. doi:10.1016/S2213-8587(20)30152-2. PMID: 32334646.
3. Xie Y, Al-Aly Z. Risks and burdens of incident diabetes in long COVID: a cohort study. *Lancet Diabetes Endocrinol.* 2022;10(5):311-321. doi:10.1016/S2213-8587(22)00044-4. PMID: 35325624.
4. Khunti K, Del Prato S, Mathieu C, Kahn SE, Gabbay RA, Buse JB. COVID-19, hyperglycemia, and new-onset diabetes. *Diabetes Care.* 2021;44(12):2645-2655. doi:10.2337/dc21-1318. PMID: 34625431.
5. Rezel-Potts E, Douiri A, Sun X, Chowienzyk PJ, Shah AM, Gulliford MC. Cardiometabolic outcomes up to 12 months after COVID-19: a matched cohort study in the UK. *PLoS Med.* 2022;19(7):e1004052. doi:10.1371/journal.pmed.1004052. PMID: 35853487.
6. Naveed Z, Velásquez García HA, Wong S, Wilton J, McKee G, Mahmood B, et al. Association of COVID-19 infection with incident diabetes: a population-based matched

- cohort study in British Columbia, Canada. *JAMA Netw Open*. 2023;6(4):e238866. doi:10.1001/jamanetworkopen.2023.8866. PMID: 37071415.
7. Zhang T, Mei Q, Zhang Z, Walline JH, Liu Y, Zhu H, et al. Risk for newly diagnosed diabetes after COVID-19: a systematic review and meta-analysis. *BMC Med*. 2022;20(1):444. doi:10.1186/s12916-022-02656-y. PMID: 36380329.
 8. Lai H, Yang M, Sun M, Pan B, Wang Q, Wang J, et al. Risk of incident diabetes after COVID-19 infection: a systematic review and meta-analysis. *Metabolism*. 2022;137:155330. doi:10.1016/j.metabol.2022.155330. PMID: 36220361.
 9. Ssentongo P, Zhang Y, Witmer L, Chinchilli VM, Ba DM. Association of COVID-19 with diabetes: a systematic review and meta-analysis. *Sci Rep*. 2022;12(1):20191. doi:10.1038/s41598-022-24185-7. PMID: 36418912.
 10. Ssentongo P, Zhang Y, Witmer L, Ba DM, Chinchilli VM. Association of COVID-19 with new-onset type 1 and type 2 diabetes: a systematic review and meta-analysis. *Biomedicine*. 2022;10(9):2072. doi:10.3390/biomedicine10092072. PMID: 36140173.
 11. Zhou J, Wang Y, Xu R. Association of COVID-19 infection and the risk of new incident diabetes: a systematic review and meta-analysis. *Front Endocrinol (Lausanne)*. 2024;15:1429848. doi:10.3389/fendo.2024.1429848. PMID: 39253580.
 12. Cocking E, Daher J, Alabboud M. New-onset diabetes mellitus post COVID-19 infection: a systematic review and meta-analysis. *Diabetes Res Clin Pract*. 2025;227:112417. doi:10.1016/j.diabres.2025.112417. PMID: 40803509.
 13. Rathmann W, Kuss O, Kostev K. Incidence of newly diagnosed diabetes after Covid-19. *Diabetologia*. 2022;65(6):949-954. doi:10.1007/s00125-022-05670-0. PMID: 35294582.
 14. Al-Aly Z. Diabetes after SARS-CoV-2 infection. *Lancet Diabetes Endocrinol*. 2023;11(1):11-13. doi:10.1016/S2213-8587(22)00324-2. PMID: 36463908.
 15. Rahmati M, Yon DK, Lee SW, Udeh R, McEvoy M, Kim MS, et al. New-onset type 1 diabetes in children and adolescents as postacute sequelae of SARS-CoV-2 infection: a systematic review and meta-analysis of cohort studies. *J Med Virol*. 2023;95(6):e28833. doi:10.1002/jmv.28833. PMID: 37264687.
 16. Qian J, Stepień S, Cheng A, Shaw JE, Macartney K, Rowe SL, et al. New-onset diabetes following SARS-CoV-2 infection in the Omicron era: a matched cohort study. *Int J Epidemiol*. 2026;55(2):dyag009. doi:10.1093/ije/dyag009. PMID: 41718663.
 17. Huiqi Li, Lisa Morris, Maria Bygdell, Ailiana Santosa, Elin Allansson Kjölhede, Katarina Eeg-Olofsson, Fredrik Nyberg, Yiyi Xu SARS-CoV-2 infection and COVID-19 vaccination and the risk for new-onset type 1 diabetes: a register-based population study in Sweden. *Diabetologia*. 2026. doi:10.1007/s00125-026-06767-6. PMID: 42251204.
 18. Müller JA, Groß R, Conzelmann C, Krüger J, Merle U, Steinhart J, et al. SARS-CoV-2 infects and replicates in cells of the human endocrine and exocrine pancreas. *Nat Metab*. 2021;3(2):149-165. doi:10.1038/s42255-021-00347-1. PMID: 33536639.
 19. Coate KC, Cha J, Shrestha S, Kawasaki W, Dai C, Phillips NY, et al. SARS-CoV-2 cell-entry factors ACE2 and TMPRSS2 are expressed in the microvasculature and ducts of human pancreas but are not enriched in β cells. *Cell Metab*. 2020;32(6):1028-1040.e4. doi:10.1016/j.cmet.2020.11.006. PMID: 33207181.
 20. Kusmartseva I, Wu W, Syed F, Van Der Heide V, Jorgensen M, Joseph P, et al. Expression of SARS-CoV-2 entry factors in the pancreas of normal organ donors and

- individuals with COVID-19. *Cell Metab.* 2020;32(6):1041-1051.e6. doi:10.1016/j.cmet.2020.11.005. PMID: 33242419.
21. Tang X, Uhl S, Zhang T, Jerber J, Lu B, Chandar V, et al. SARS-CoV-2 infection induces beta cell transdifferentiation. *Cell Metab.* 2021;33(8):1577-1591.e7. doi:10.1016/j.cmet.2021.05.015. PMID: 34043941.
 22. Fadini GP, Morieri ML, Boscari F, Fioretto P, Avogaro A. Newly-diagnosed diabetes and admission hyperglycemia predict mortality in COVID-19 patients: a meta-analysis. *J Endocrinol Invest.* 2020;43(12):1797-1800. doi:10.1007/s40618-020-01405-8. PMID: 32886367.
 23. Lawal B, Saidu Musa S, Soe Thu M, Ondee T, Chatsirisakul O, Pongpirul K. Post-acute metabolic changes and risk of new-onset diabetes following COVID-19: a systematic review and meta-analysis. *Front Endocrinol (Lausanne).* 2026;17:1835180. doi:10.3389/fendo.2026.1835180. PMID: 42255427.
 24. Tyrer F, Gharibzadeh S, Gillies C, Lawson C, Routen A, Islam N, et al.; PHOSP-COVID Study Collaborative Group. Incidence of diabetes mellitus following hospitalisation for COVID-19 in the United Kingdom: a prospective observational study. *Diabetes Obes Metab.* 2025;27(2):767-776. doi:10.1111/dom.16071. PMID: 39563623.
 25. RECOVERY Collaborative Group, Horby P, Lim WS, Emberson JR, Mafham M, Bell JL, et al. Dexamethasone in hospitalized patients with COVID-19. *N Engl J Med.* 2021;384(8):693-704. doi:10.1056/NEJMoa2021436. PMID: 32678530.
 26. Rayman G, Lumb AN, Kennon B, Cottrell C, Nagi D, Page E, et al. Guidance on the management of diabetic ketoacidosis in the exceptional circumstances of the COVID-19 pandemic. *Diabet Med.* 2020;37(7):1214-1216. doi:10.1111/dme.14328. PMID: 32410245.
 27. Cromer SJ, Colling C, Schatoff D, Puri M, Wexler DJ, Faulkner-Jones B, et al. Newly diagnosed diabetes versus transient hyperglycemia in COVID-19: analysis of a large urban cohort. *Diabetes Care.* 2022;45(6):1418-1426. doi:10.2337/dc21-2244. PMID: 35439268.
 28. Wander PL, Lowy E, Beste LA, Barry F, Adams SV, Boyko EJ, et al. Dynamics of diabetes risk after SARS-CoV-2 infection in US veterans: a target trial emulation. *Lancet Diabetes Endocrinol.* 2023;11(10):734-744. doi:10.1016/S2213-8587(23)00224-3. PMID: 37690620.
 29. Al-Aly Z, Bowe B, Xie Y. Long COVID pale after SARS-CoV-2 infection with Delta and Omicron variants and by vaccination status. *Nat Commun.* 2024;15(1):6108. doi:10.1038/s41467-024-50478-w. PMID: 39039088.
 30. Kwan AC, Ebinger JE, Botting P, Navarrette J, Cheng S. Association of COVID-19 vaccination with risks for incident diabetes after COVID-19 infection. *JAMA Netw Open.* 2023;6(2):e2255957. doi:10.1001/jamanetworkopen.2022.55957. PMID: 36787050.
 31. Mahmudpour M, Roozbeh J, Jahromi M, Sinaei R, Bastani B. An update on the role of renin-angiotensin-aldosterone system in COVID-19. *J Renin Angiotensin Aldosterone Syst.* 2022;2022:2784534. doi:10.1155/2022/2784534. PMID: 35783307.
 32. Gheblawi M, Wang K, Viveiros A, Nguyen Q, Zhong JC, Turner AJ, et al. Angiotensin-converting enzyme 2: SARS-CoV-2 receptor and regulator of the renin-angiotensin

- system: celebrating the centenary of the American Physiological Society. *Circ Res.* 2020;126(10):1456-1474. doi:10.1161/CIRCRESAHA.120.317015. PMID: 32264791.
33. Kuba K, Imai Y, Rao S, Gao H, Guo F, Guan B, et al. A crucial role of angiotensin converting enzyme 2 (ACE2) in SARS coronavirus-induced lung injury. *Nat Med.* 2005;11(8):875-879. doi:10.1038/nm1267. PMID: 16007097.
34. Reiterer M, Rajan M, Gómez-Banoy N, Lau JD, Gomez-Escobar LG, Ma L, et al. Hyperglycemia in acute COVID-19 is characterized by insulin resistance and adipose tissue dysfunction. *Cell Metab.* 2021;33(11):2174-2188.e6. doi:10.1016/j.cmet.2021.09.004. PMID: 34563633.
35. Santos A, Magro DO, Evangelista-Poderoso R, Saad MJ. Diabetes, obesity, and insulin resistance in COVID-19: molecular interrelationship and pleiotropic properties of metformin. *Cell Death Discov.* 2021;7(1):159. doi:10.1038/s41420-021-00543-1. PMID: 34188015.

10. ZNACZENIE MIKROBIOTY POCHWY W PATOGENEZIE I NAWROTACH BAKTERYJNEGO ZAPALENIA POCHWY

Patrycja Zychowicz, Aleksandra Grzesiak, Łukasz Kwaśniak

Uniwersytet Jana Długosza

Collegium Medicum im. dr. W. Biegańskiego

Al. Armii Krajowej 13/15, 42-200 Częstochowa

E-mail: patrycja_zychowicz@o2.pl,

aleksandragrzesiak2003@wp.pl,

kwasniakukasz@gmail.com

Wiktor Wojciechowski

Akademia WSB w Dąbrowie Górniczej

ul. Cieplaka 1C, 41-300 Dąbrowa Górnicza

E-mail: wiktorkojciechowski433@gmail.com

Abstrakt: Bakteryjne zapalenie pochwy (BV) należy do najczęstszych zaburzeń mikrobioty pochwy u kobiet w wieku reprodukcyjnym. Nie jest ono klasycznym zakażeniem wywołanym przez jeden patogen, lecz złożonym zaburzeniem ekosystemu mikrobiologicznego, związanym ze zmniejszeniem udziału bakterii z rodzaju *Lactobacillus*, wzrostem liczebności bakterii związanych z BV oraz tworzeniem wielogatunkowych biofilmów. Jednym z ważniejszych problemów klinicznych są częste nawroty choroby. Celem pracy była analiza roli mikrobioty pochwy w rozwoju i nawrotach BV, a także ocena możliwości wykorzystania tej wiedzy w diagnostyce, profilaktyce i leczeniu. W pracy przeprowadzono krytyczny przegląd piśmiennictwa obejmującego badania obserwacyjne, randomizowane badania kliniczne, metaanalizy, prace przeglądowe oraz aktualne zalecenia. W kontekście stabilności mikrobioty szczególną uwagę zwraca się na *Lactobacillus crispatus*, choć jej skład może być różny u poszczególnych kobiet, dlatego nie można oceniać zdrowia na podstawie jednego, uniwersalnego profilu mikrobioty. W powstawaniu i utrzymywaniu dysbiozy znaczenie może mieć również wielogatunkowy biofilm zawierający m.in. *Gardnerella spp.* i *Fannyhessea vaginae*, który może sprzyjać nawrotom BV. Nawracanie choroby ma charakter wieloczynnikowy i może być związane z niepełną odbudową mikrobioty, utrzymywaniem się biofilmu, czynnikami gospodarza oraz ponowną ekspozycją seksualną. Obiecujące wyniki uzyskano w badaniach dotyczących celowanej odbudowy mikrobioty z wykorzystaniem *Lactobacillus crispatus* CTV-05 (Lactin-V), a także równoczesnego leczenia partnera seksualnego. Diagnostyka molekularna pozwala na dokładniejszą charakterystykę mikrobioty, jednak jej przydatność w przewidywaniu nawrotów BV jest nadal ograniczona. BV powinno być więc traktowane jako zaburzenie całego ekosystemu pochwy, a skuteczne zapobieganie nawrotom może wymagać połączenia standardowego leczenia z postępowaniem ukierunkowanym na odbudowę mikrobioty, biofilm oraz czynniki związane z partnerem i gospodarzem. Strategie terapeutyczne ukierunkowane na mikrobiotę są obiecującym kierunkiem dalszego rozwoju leczenia, ale ich skuteczność wymaga jeszcze potwierdzenia w badaniach klinicznych.

1. Wstęp

Bakteryjne zapalenie pochwy (bacterial vaginosis, BV) jest jednym z najczęstszych zaburzeń mikrobiologicznych pochwy u kobiet w wieku reprodukcyjnym. Nie stanowi klasycznego zakażenia wywołanego przez pojedynczy patogen, lecz złożony stan dysbiozy, w którym dochodzi do zmniejszenia udziału ochronnych bakterii z rodzaju *Lactobacillus* oraz zwiększenia liczebności zróżnicowanej społeczności bakterii beztlenowych i względnie beztlenowych [1-4]. Obraz kliniczny może obejmować jednorodną, szarawobiałą wydzielinę, charakterystyczny rybi zapach, podwyższenie pH pochwy oraz obecność komórek jeżowych (clue cells), jednak znaczna część przypadków pozostaje bezobjawowa [1,2]. Istotnym problemem klinicznym jest duża częstość nawrotów. U części kobiet BV powraca w ciągu kilku miesięcy od zakończenia leczenia, a ryzyko kolejnych epizodów zwiększa się wraz z liczbą przebytych nawrotów [1,3]. Nawracające BV może negatywnie wpływać na jakość życia, a sam stan dysbiozy wiąże się ze zwiększonym ryzykiem nabywania zakażeń przenoszonych drogą płciową oraz niektórych niekorzystnych następstw położniczych i ginekologicznych [1,3]. Rosnąca liczba badań mikrobiologicznych wskazuje, że istotą BV jest zaburzenie funkcjonowania całego ekosystemu pochwy. Szczególne znaczenie przypisuje się utracie dominacji określonych gatunków *Lactobacillus*, zwiększeniu liczebności bakterii związanych z BV oraz powstawaniu wielogatunkowych biofilmów, które mogą utrudniać eliminację dysbiotycznej społeczności podczas standardowego leczenia [3-6]. Z tego względu zrozumienie zależności pomiędzy składem mikrobioty, jej funkcją metaboliczną, biofilmem i odpowiedzią gospodarza ma znaczenie dla wyjaśnienia zarówno patogenezy BV, jak i jego nawrotowości. Celem niniejszej pracy jest krytyczna analiza aktualnych danych dotyczących znaczenia mikrobioty pochwy w rozwoju BV i jego nawrotach, ze szczególnym uwzględnieniem roli bakterii z rodzaju *Lactobacillus*, bakterii związanych z BV, biofilmu, czynników wpływających na utrzymanie dysbiozy oraz możliwości wykorzystania wiedzy o mikrobiomie w zapobieganiu nawrotom i opracowywaniu nowych metod leczenia.

2. Prawidłowa mikrobiota pochwy

Mikrobiota pochwy jest dynamicznym ekosystemem, którego skład różni się pomiędzy kobietami i zmienia się w czasie pod wpływem czynników hormonalnych, środowiskowych, seksualnych i behawioralnych [3,7]. U wielu kobiet w wieku reprodukcyjnym mikrobiota jest zdominowana przez bakterie z rodzaju *Lactobacillus*, jednak dominacja tych bakterii nie jest warunkiem absolutnym zdrowia, a brak przewagi *Lactobacillus* nie zawsze oznacza chorobę. Wprowadzenie technik sekwencjonowania genu 16S rRNA pozwoliło na odrzucenie koncepcji jednej, uniwersalnej „prawidłowej flory” i wyodrębnienie pięciu głównych typów stanu społeczności (*community state types*, CST) [7]:

- **CST I:** z dominacją *Lactobacillus crispatus* -profil o najwyższej stabilności i najsilniejszych właściwościach protekcyjnych;
- **CST II:** z dominacją *Lactobacillus gasseri*;
- **CST III:** z dominacją *Lactobacillus iners* -układ o obniżonej stabilności, stanowiący często stan przejściowy ku dysbiozie;
- **CST IV:** zróżnicowana społeczność beztlenowa o niskiej liczebności *Lactobacillus*, z przewagą rodzajów *Gardnerella*, *Atopobium*, *Prevotella* i *Sneathia*;
- **CST V:** z dominacją *Lactobacillus jensenii*. [3,7].

Obecność profilu CST IV u części całkowicie bezobjawowych, zdrowych kobiet (zwłaszcza pochodzenia afrykańskiego i latynoamerykańskiego) dowodzi, że wysoka różnorodność taksonomiczna lub niska liczebność pałeczek kwasu mlekowego nie muszą być jednoznaczne z procesem chorobowym [7,23,24].

Najważniejszym mechanizmem ochronnym związanym z *Lactobacillus* jest produkcja kwasu mlekowego. W dojrzałym nabłonku pochwy, pod wpływem estrogenów, dochodzi do gromadzenia glikogenu, który pośrednio dostarcza substratów dla metabolizmu bakterii kwasu mlekowego [3,8]. Produkcja kwasu mlekowego przyczynia się do utrzymania kwaśnego środowiska pochwy, zwykle o pH około 3,8-4,5 u kobiet w wieku reprodukcyjnym [3]. Niskie pH ogranicza wzrost wielu bakterii związanych z BV oraz wpływa na interakcje pomiędzy mikrobiotą i komórkami gospodarza.

Nie wszystkie gatunki *Lactobacillus* mają jednak identyczne właściwości biologiczne. *L. crispatus* jest szczególnie często związany ze stabilnym, kwaśnym środowiskiem pochwy i uważa się go za jeden z gatunków zapewniających silną ochronę przed dysbiozą [3,7,9]. Z kolei *L. iners* może występować zarówno w mikrobiocie zdrowej, jak i w stanach przejściowych oraz dysbiotycznych. Jego znaczenie jest złożone i nie można traktować go jako jednoznacznego patogenu [9,10]. Badania wskazują jednak, że społeczności zdominowane przez *L. iners* mogą być mniej stabilne i częściej obserwuje się je podczas przechodzenia pomiędzy stanem względnej eubiozy a dysbiozą [9,10].

Oprócz zakwaszania środowiska *Lactobacillus* mogą oddziaływać na mikrobiotę poprzez konkurencję o składniki odżywcze i miejsca adhezji, wytwarzanie substancji przeciwdrobnoustrojowych oraz modulowanie odpowiedzi immunologicznej gospodarza [3,8]. W starszej literaturze duże znaczenie przypisywano produkcji nadtlenu wodoru przez *Lactobacillus*, jednak obecnie większą wagę przywiązuje się do kompleksowego działania kwasu mlekowego, metabolitów bakteryjnych, konkurencji ekologicznej i interakcji z nabłonkiem. Nie wszystkie szczepy *Lactobacillus* produkują nadtlenek wodoru, dlatego mechanizmu tego nie należy traktować jako uniwersalnej podstawy ochrony pochwy [3].

Mikrobiota pochwy pozostaje również pod silnym wpływem hormonów. W okresie przedpokwitaniowym i po menopauzie, przy niższym stężeniu estrogenów, zmniejsza się dostępność glikogenu i częściej obserwuje się większą różnorodność mikrobiologiczną oraz wyższe pH [3]. Wahania hormonalne związane z cyklem miesięczkowym mogą powodować przejściowe zmiany składu mikrobioty. Menstruacja stanowi fizjologiczny czynnik destabilizujący: krew buforuje pH do wartości obojętnych, a hem dostarcza żelaza, co wywołuje przejściowy spadek populacji *Lactobacillus* i namnażanie beztlenowców [7,11].

Prawidłowa mikrobiota pochwy powinna zatem być postrzegana nie jako jeden uniwersalny wzorzec, lecz jako dynamiczny zakres stanów ekologicznych. O zdrowiu decyduje nie tylko obecność określonego gatunku, ale także funkcjonalna równowaga pomiędzy mikroorganizmami, środowiskiem pochwy i gospodarzem [3,7].

3. Dysbioza i znaczenie biofilmu w patogenezie BV

Dysbioza pochwy oznacza zaburzenie prawidłowej równowagi mikrobiologicznej tego środowiska. Jedną z jej najważniejszych cech jest zmniejszenie udziału bakterii z rodzaju *Lactobacillus* oraz zwiększenie liczebności bakterii beztlenowych i względnie beztlenowych [1,3,4]. W przypadku BV nie można wskazać jednego drobnoustroju odpowiedzialnego za

rozwój choroby. Jest to raczej złożone zaburzenie mikroekologiczne, w którym znaczenie mają zarówno wzajemne oddziaływania między mikroorganizmami, jak i ich relacje z organizmem gospodarza [1,4,19,23]. W mikrobiocie związanej z BV częściej występują między innymi bakterie z rodzajów *Gardnerella*, *Prevotella*, *Sneathia*, *Megasphaera* oraz *Mobiluncus* [1,3-5,20]. Szczególną uwagę zwraca się na bakterie z rodzaju *Gardnerella*, które mogą odgrywać ważną rolę we wczesnych etapach powstawania biofilmu. Następnie do takiej struktury mogą dołączać kolejne gatunki bakterii, tworząc wielogatunkową społeczność na powierzchni nabłonka pochwy [4-6,20,25]. Biofilm jest strukturą, w której mikroorganizmy są związane z powierzchnią i otoczone wytwarzaną przez siebie macierzą zewnątrzkomórkową. Taki sposób organizacji może ułatwiać utrzymywanie się bakterii w środowisku pochwy oraz zmniejszać ich podatność na działanie przeciwdrobnoustrojowe. Z tego względu obecność biofilmu jest wskazywana jako jeden z możliwych czynników sprzyjających utrzymywaniu się dysbiozy i nawrotom BV [4-6,12,25]. Rola biofilmu nie sprowadza się jednak wyłącznie do ochrony tworzących go bakterii. Mikroorganizmy znajdujące się w jego obrębie mogą wzajemnie wykorzystywać produkty swojego metabolizmu i w ten sposób wpływać na dostępność składników odżywczych oraz środowisko, w którym funkcjonują [4-6,25,26]. Wielogatunkowy charakter biofilmu ma w tym przypadku istotne znaczenie, ponieważ bakterie o różnych możliwościach metabolicznych mogą współistnieć i wzajemnie uzupełniać swoje funkcje. Może to ułatwiać utrzymywanie się mikrobioty charakterystycznej dla BV [4-6]. Zmiany zachodzące w mikrobiocie znajdują odzwierciedlenie również w środowisku chemicznym pochwy. W przebiegu BV zwiększa się stężenie niektórych amin biogennych, między innymi putrescyny, kadaweryny i trimetyloaminy. Związki te wiążą się z charakterystycznym, nieprzyjemnym zapachem wydzieliny, który staje się szczególnie wyraźny po podwyższeniu pH podczas wykonania testu aminowego [1,3,26]. Jednocześnie ograniczenie liczby bakterii wytwarzających kwas mlekowy wiąże się ze wzrostem pH pochwy. Powstające w ten sposób środowisko jest mniej korzystne dla dominacji *Lactobacillus* i może sprzyjać bakteriom związanym z BV [3,8,24]. Niektóre bakterie występujące w przebiegu BV wytwarzają również enzymy, które mogą oddziaływać na śluz i powierzchnię nabłonka pochwy. Należą do nich między innymi sialidazy oraz enzymy uczestniczące w rozkładzie składników śluzu [3,5]. Ich działanie może ułatwiać bakteriom kolonizację i utrzymywanie się w środowisku pochwy. Nie oznacza to jednak, że BV należy traktować jako typową infekcję inwazyjną. Charakterystyczną cechą tego zaburzenia pozostaje przede wszystkim zmiana składu i funkcjonowania mikrobioty oraz związana z nią utrata prawidłowej równowagi mikroekologicznej [1-4]. Jednym z następstw dysbiozy jest osłabienie ochronnych funkcji mikrobioty zdominowanej przez *Lactobacillus*. Bakterie te przyczyniają się do utrzymywania kwaśnego środowiska pochwy poprzez produkcję kwasu mlekowego. Ich zmniejszona liczebność może prowadzić do wzrostu pH, co może ułatwiać rozwój bakterii związanych z BV [1,3,8,24]. Jednocześnie metabolizm tych bakterii oraz ich współistnienie w obrębie biofilmu mogą utrudniać powrót mikrobioty do stanu zdominowanego przez *Lactobacillus*. W rezultacie powstaje środowisko, które sprzyja dalszemu utrzymywaniu się dysbiozy i może mieć znaczenie w występowaniu nawrotów BV. BV nie należy więc postrzegać jako zakażenia wywołanego wyłącznie przez *Gardnerella vaginalis* lub inny pojedynczy gatunek bakterii. Obecny stan wiedzy wskazuje raczej na wieloczynnikowy charakter tego zaburzenia,

obejmujący zmiany w składzie mikrobioty, jej aktywności metabolicznej, powstawanie biofilmu oraz wzajemne oddziaływania między mikroorganizmami i gospodarzem [1-6,19,23].

4. Rola mikrobioty w nawrotach bakteryjnego zapalenia pochwy

Nawroty bakteryjnego zapalenia pochwy (BV) są częste i stanowią istotny problem związany z trwałością efektu leczenia. W ciągu roku mogą wystąpić nawet u 50–80% pacjentek [1,2]. Ich przyczyny są złożone i obejmują przede wszystkim utrzymywanie się biofilmu, niepełną odbudowę prawidłowej mikrobioty oraz czynniki związane z aktywnością seksualną i środowiskiem pochwy [1,5,6].

4.1. Przetrwały biofilm bakteryjny

Jednym z mechanizmów sprzyjających nawrotom BV jest utrzymywanie się biofilmu na powierzchni nabłonka pochwy [4,6]. Szczególne znaczenie przypisuje się bakteriom z rodzaju *Gardnerella*, które mogą tworzyć wielogatunkowe struktury biofilmowe. Ich organizacja sprzyja przetrwaniu bakterii i może ograniczać skuteczność leczenia przeciwdrobnoustrojowego [4,6,25]. W biofilmie mogą występować również m.in. *Prevotella bivia* i *Fannyhessea vaginae* [27]. W konsekwencji ustąpienie objawów po antybiotykoterapii nie zawsze oznacza całkowitą eliminację zaburzonej mikrobioty, co może sprzyjać szybkiemu nawrotowi BV [1,4,6].

4.2. Niepełna odbudowa mikrobioty i znaczenie *Lactobacillus iners*

Istotnym elementem powrotu do eubiozy jest odbudowa mikrobioty zdominowanej przez pałeczki *Lactobacillus*, szczególnie *Lactobacillus crispatus* [1,7,16,22]. Bakterie te uczestniczą w utrzymaniu kwaśnego środowiska pochwy poprzez produkcję kwasu mlekowego i ograniczają rozwój mikroorganizmów związanych z BV [7,24]. Po leczeniu nie zawsze dochodzi jednak do trwałej dominacji *L. crispatus*. U części kobiet obserwuje się przewagę *Lactobacillus iners*, który może stanowić mniej stabilny etap odbudowy mikrobioty [9,10]. Różnice w metabolizmie obu gatunków mogą wpływać na właściwości ochronne środowiska pochwy [9,11]. Znaczenie trwałej kolonizacji przez *L. crispatus* potwierdzają badania nad Lactin-V, w których jego zastosowanie zmniejszało ryzyko nawrotu BV [16,22]. Ponadto większa różnorodność mikrobioty w momencie rozpoznania BV wiązała się z większym ryzykiem nawrotu po leczeniu metronidazolem [12].

4.3. Rola partnera seksualnego

Aktywność seksualna jest jednym z czynników związanych z nawrotami BV [1,21,23]. Bakterie związane z BV mogą być wymieniane między partnerami, a u mężczyzn mogą utrzymywać się m.in. w obrębie skóry prącia i cewki moczowej [21]. Wykazano podobieństwo części bakterii, zwłaszcza *Gardnerella*, u kobiet i ich partnerów [21]. Nie oznacza to jednak, że BV należy traktować jako klasyczną chorobę przenoszoną drogą płciową [1,23]. Istotnych danych dostarczyło badanie StepUp, w którym jednoczesne leczenie partnera zmniejszyło częstość nawrotów BV z 63% do 35% [13]. Wyniki te znalazły odzwierciedlenie w aktualizacji zaleceń ACOG z 2025 r., zgodnie z którą u pacjentek z nawracającym objawowym BV można rozważyć równoczesne leczenie męskiego partnera

[28]. Nie wszystkie nawroty można jednak przypisywać retransmisji bakterii, ponieważ ich występowanie zależy również od mikrobioty i indywidualnej podatności pacjentki [1,23].

4.4. Czynniki ryzyka nawrotów

Nawrotowość BV jest zjawiskiem wieloczynnikowym. Oprócz składu mikrobioty znaczenie mogą mieć aktywność seksualna, nowy partner, stosunki bez prezerwatywy, irygacje pochwy oraz palenie tytoniu [1,3,23]. Istotna może być również indywidualna odpowiedź immunologiczna oraz wpływ metabolitów mikrobioty na miejscowe środowisko pochwy [8]. Nawrót BV należy zatem postrzegać jako zaburzenie równowagi całego ekosystemu pochwy. Utrzymywanie się biofilmu, brak trwałej dominacji ochronnych *Lactobacillus*, ponowna ekspozycja seksualna oraz czynniki środowiskowe mogą wspólnie zwiększać ryzyko ponownego wystąpienia dysbiozy [1,4,6,13].

5. Mikrobiota pochwy a leczenie bakteryjnego zapalenia pochwy

5.1. Terapia standardowa i jej ograniczenia

Podstawą leczenia bakteryjnego zapalenia pochwy (BV) pozostaje antybiotykoterapia, przede wszystkim metronidazol lub klindamycyna; w określonych sytuacjach stosuje się również tynidazol lub seknidazol [1,2]. Leczenie ogranicza nadmierny wzrost bakterii związanych z BV i zwykle prowadzi do ustąpienia objawów, jednak jego trwała skuteczność jest ograniczona przez częste nawroty [1,3]. Wynika to m.in. z faktu, że eliminacja bakterii związanych z BV nie zawsze prowadzi do pełnego odtworzenia mikrobioty zdominowanej przez korzystne gatunki *Lactobacillus*. Utrzymywanie się zaburzonego ekosystemu, zwłaszcza w obecności wielogatunkowego biofilmu, może sprzyjać ponownemu rozwojowi choroby [4,6,12]. W przypadku nawrotowego BV stosuje się także schematy leczenia supresyjnego, które mogą zmniejszać częstość nawrotów w czasie terapii. Ich ograniczeniem pozostaje brak trwałego przywrócenia prawidłowej mikrobioty, dlatego w leczeniu nawrotów analizuje się również metody wspierające jej odbudowę oraz ograniczające utrzymywanie się biofilmu [1,2,4].

5.2. Probiotyko- i żywe bioterapeutyki

Znaczenie bakterii z rodzaju *Lactobacillus* w utrzymaniu prawidłowego środowiska pochwy stanowi podstawę zainteresowania probiotykami oraz żywymi bioterapeutykami zawierającymi określone szczepy tych bakterii. Metaanalizy badań randomizowanych wskazują, że wybrane preparaty probiotyczne, stosowane jako uzupełnienie antybiotykoterapii lub po jej zakończeniu, mogą zwiększać skuteczność leczenia i zmniejszać ryzyko nawrotu BV. Wyniki poszczególnych badań nie są jednak jednoznaczne, m.in. ze względu na różnice w stosowanych szczepach, dawkach, drodze podania i czasie terapii [14,15]. Jednym z najlepiej przebadanych preparatów jest Lactin-V zawierający *Lactobacillus crispatus* CTV-05. W randomizowanym badaniu klinicznym nawrót BV do 12. tygodnia wystąpił u około 30% kobiet otrzymujących Lactin-V oraz u około 45% kobiet z grupy placebo. Wynik ten wskazuje, że celowana odbudowa mikrobioty może mieć znaczenie w ograniczaniu nawrotów choroby [16]. W dalszej analizie wykazano również utrzymywanie się korzystnego wpływu terapii na lokalne mechanizmy immunologiczne [22]. Dane te

przemawiają za podejściem, w którym leczenie BV obejmuje nie tylko eliminację bakterii związanych z dysbiozą, ale również sprzyjanie ponownej kolonizacji pochwy przez korzystne szczepy *Lactobacillus*. [14-16]

5.3. Biofilm i nowe strategie terapeutyczne

Kolejnym obszarem badań nad leczeniem BV jest oddziaływanie na wielogatunkowy biofilm tworzony przez bakterie związane z chorobą. Jego obecność może zwiększać tolerancję bakterii na leczenie i ułatwiać utrzymywanie się dysbiozy, co czyni biofilm potencjalnym celem terapii nawrotowego BV [4,6]. Przykładem takiego podejścia jest astodrimer, polimerowy żel opracowany w celu ograniczenia adhezji bakterii i wpływania na strukturę biofilmu. W badaniu III fazy zastosowanie preparatu wiązało się ze zmniejszeniem częstości nawrotów BV, co wskazuje na możliwą przydatność terapii ukierunkowanych na biofilm [17]. Jeszcze na wcześniejszym etapie rozwoju znajduje się przeszczep mikrobioty pochwy (vaginal microbiome transplantation, VMT). W pilotażowym badaniu obejmującym pięć kobiet z ciężkim, nawrotowym BV u czterech uzyskano długotrwałą remisję po zastosowaniu mikrobioty pochodzącej od odpowiednio dobranych dawczyń [18]. Wynik ten wskazuje na możliwość bezpośredniej odbudowy ekosystemu pochwy, jednak bardzo mała liczebność badanej grupy, brak grupy kontrolnej oraz konieczność standaryzacji procedury i oceny jej bezpieczeństwa ograniczają możliwość wyciągania dalszych wniosków. VMT pozostaje obecnie metodą eksperymentalną [18].

5.4. Znaczenie partnera seksualnego i nowe podejście do profilaktyki nawrotów

BV nie musi być wyłącznie zaburzeniem ograniczonym do mikrobioty pochwy. Podobieństwo składu mikrobioty u partnerów seksualnych oraz możliwość utrzymywania się bakterii związanych z BV w obrębie męskich dróg płciowych wskazują, że partner może uczestniczyć w podtrzymywaniu dysbiozy i nawrotów choroby [21,23]. Znaczenie tej zależności potwierdziło randomizowane badanie StepUp. U kobiet z BV, których partnerzy otrzymywali równoczesne leczenie przeciwbakteryjne, nawrót BV w ciągu 12 tygodni wystąpił u 35% kobiet, w porównaniu z 63% w grupie, w której leczeniu poddawano wyłącznie kobietę [13]. Wyniki te wskazują, że leczenie partnera może być istotnym elementem zapobiegania nawrotom u części pacjentek. W 2025 r. American College of Obstetricians and Gynecologists wskazał, że u pacjentek z nawracającym objawowym BV można rozważyć równoczesne leczenie męskiego partnera seksualnego, z uwzględnieniem wspólnego podejmowania decyzji terapeutycznej [28].

6. Znaczenie kliniczne i perspektywy

Tradycyjna diagnostyka BV opiera się przede wszystkim na kryteriach Amsela oraz skali Nugenta. W pierwszym przypadku uwzględnia się obraz kliniczny, pH wydzieliny, wynik testu aminowego oraz obecność komórek „clue cells”. Skala Nugenta opiera się natomiast na ocenie charakterystycznych zmian w preparacie barwionym metodą Grama [1,2,19]. Rozwój metod molekularnych pozwolił na dokładniejszą charakterystykę mikrobioty pochwy. Multipleksowe testy NAAT umożliwiają jednoczesne wykrywanie kilku gatunków bakterii związanych z BV, natomiast sekwencjonowanie 16S rRNA i metagenomika shotgun pozwalają ocenić skład całej społeczności mikroorganizmów [19]. Metody te umożliwiają

zatem znacznie szerszą charakterystykę mikrobioty niż klasyczne techniki hodowlane [19]. Profilowanie mikrobioty może w przyszłości znaleźć zastosowanie również w ocenie ryzyka nawrotu BV. Wykazano, że określone układy mikroorganizmów, w tym społeczności z przewagą bakterii związanych z BV lub związane z niepełną rekonstytucją populacji *L. crispatus*, mogą wskazywać na większą podatność na nawroty [12,19]. Nie opracowano jednak dotychczas jednego, powszechnie akceptowanego profilu mikrobiologicznego, który pozwalałby z wystarczającą dokładnością przewidzieć nawrót u konkretnej pacjentki [19]. Ograniczeniem metod opartych na analizie DNA jest również fakt, że sama obecność danego drobnoustroju nie świadczy o jego aktywności biologicznej. Sekwencjonowanie może potwierdzić obecność określonego mikroorganizmu, ale nie pozwala jednoznacznie ocenić jego aktywności metabolicznej, produkcji czynników wirulencji ani rzeczywistego znaczenia klinicznego [3,19].

7. Dyskusja

Dostępne dane wskazują, że mikrobiota pochwy odgrywa istotną rolę w patogenezie BV, jednak zależności te są bardziej złożone niż prosty podział na bakterie „dobre” i „złe”. BV wiąże się przede wszystkim ze zmniejszeniem udziału ochronnych gatunków *Lactobacillus*, wzrostem liczebności bakterii beztlenowych oraz podwyższeniem pH pochwy [1–4]. W patogenezie i utrzymywaniu się dysbiozy znaczenie przypisuje się także biofilmowi. Wielogatunkowe struktury zawierające *Gardnerella* oraz inne bakterie związane z BV mogą utrzymywać się na powierzchni nabłonka, co prawdopodobnie sprzyja utrzymywaniu się dysbiozy i może ograniczać skuteczność leczenia [4–6]. Biofilm nie wyjaśnia jednak wszystkich przypadków nawrotowego BV. Znaczenie mogą mieć również niepełna eradykacja bakterii, brak odbudowy prawidłowej mikrobioty, ponowna ekspozycja seksualna, zmiany hormonalne oraz indywidualne cechy gospodarza. Podobne zastrzeżenia dotyczą *L. iners*. Gatunek ten częściej występuje w społecznościach o przejściowym lub dysbiotycznym charakterze, jednak sama jego obecność nie pozwala uznać go za bezpośrednią przyczynę BV [9,10]. *L. iners* może raczej towarzyszyć zmianom w składzie mikrobioty i stanowić element mniej stabilnego środowiska niż mikrobiota zdominowana przez *L. crispatus*. Na złożoność tych zależności wskazuje również fakt, że społeczności mikrobiologiczne ubogie w *Lactobacillus* występują także u części kobiet bez objawów BV. Sam skład mikrobioty nie jest więc wystarczający do określenia stanu zdrowia pochwy. Znaczenie mogą mieć również produkowane metabolity, stan nabłonka, odpowiedź immunologiczna, gospodarka hormonalna oraz czynniki środowiskowe [3,7]. W ostatnich latach zwrócono większą uwagę na udział partnera seksualnego w nawrotach BV. Badanie StepUp z 2025 r. wykazało, że leczenie partnera męskiego może zmniejszać ryzyko kolejnego epizodu BV u kobiety [13]. Wynik ten sugeruje, że wymiana mikroorganizmów między partnerami może mieć znaczenie dla utrzymywania się dysbiozy i jej nawrotów. Nie oznacza to jednak, że BV należy traktować jako typową infekcję przenoszoną drogą płciową. W leczeniu aktywnego BV nadal podstawowe znaczenie ma antybiotykoterapia, natomiast w przypadku nawrotów coraz większe zainteresowanie budzą strategie ukierunkowane na odbudowę mikrobioty. Przykładem jest Lactin-V, którego działanie opiera się na zastosowaniu *L. crispatus*. Wyniki badań nad tym preparatem wspierają koncepcję, według której w wybranych przypadkach samo ograniczenie bakterii związanych z BV może być niewystarczające i konieczna może

być również odbudowa ochronnego środowiska mikrobiologicznego [16]. Nie wszystkie probiotyki można jednak obecnie uznać za metody leczenia o potwierdzonej skuteczności. Metaanalizy wskazują na możliwość uzyskania korzystnego efektu, ale wyniki poszczególnych badań są trudne do bezpośredniego porównania ze względu na różnice w zastosowanych szczepach, preparatach i schematach leczenia [14,15]. Z tego względu dalsze badania powinny koncentrować się na dobrze scharakteryzowanych szczepach oraz konkretnych produktach bioterapeutycznych, a nie na probiotykach jako jednolitej grupie. Interpretację wyników badań nad mikrobiotą dodatkowo utrudnia problem przyczynowości. Badania obserwacyjne pokazują, że określone profile mikrobiologiczne częściej występują u kobiet z BV lub jego nawrotami, ale na ich podstawie trudno rozstrzygnąć, czy są one przyczyną dysbiozy, jej konsekwencją, czy też częścią szerszego mechanizmu. Na wyniki mogą wpływać również różnice w metodach diagnostycznych, charakterystyce badanych populacji, definicji nawrotu, fazie cyklu miesięczkowego, aktywności seksualnej oraz wcześniejszym stosowaniu antybiotyków. Obecny stan wiedzy przemawia więc za wieloczynnikowym modelem patogenezy i nawrotów BV. Dysbioza jest jednym z najważniejszych elementów tego procesu, ale jej utrzymywanie się może zależeć jednocześnie od biofilmu, właściwości ochronnych *Lactobacillus*, środowiska pochwy, odpowiedzi gospodarza oraz wymiany mikroorganizmów między partnerami. Z tego względu przyszłe strategie leczenia nawrotowego BV mogą łączyć eradykację bakterii związanych z dysbiozą z działaniami ukierunkowanymi na biofilm, ograniczenie ponownej ekspozycji oraz odbudowę mikrobioty.

8. Wnioski

Bakteryjne zapalenie pochwy należy przede wszystkim traktować jako zaburzenie ekosystemu mikrobiologicznego pochwy, a nie jako klasyczne zakażenie wywołane przez jeden określony patogen. Istotne znaczenie ma obecność bakterii z rodzaju *Lactobacillus*, szczególnie *L. crispatus*, które sprzyjają utrzymaniu kwaśnego środowiska i stabilności mikrobioty. Jednocześnie prawidłowy skład mikrobioty może różnić się pomiędzy kobietami, dlatego nie można wskazać jednego, uniwersalnego wzorca uznawanego za prawidłowy. W utrzymywaniu dysbiozy ważną rolę odgrywa wielogatunkowy biofilm, w którego skład mogą wchodzić m.in. *Gardnerella* spp. oraz *Fannyhessea vaginae*. Jego obecność może mieć również znaczenie w przypadku nawrotów BV po zakończeniu leczenia. Sam mechanizm nawrotów jest jednak bardziej złożony i prawdopodobnie zależy od kilku współistniejących czynników. Znaczenie mogą mieć zarówno utrzymująca się dysbioza i niepełna odbudowa prawidłowej mikrobioty, jak i obecność biofilmu, czynniki związane z gospodarzem oraz ponowna ekspozycja seksualna. Jedną z bardziej interesujących możliwości zapobiegania nawrotom jest celowana odbudowa mikrobioty. Przykładem takiego podejścia jest *Lactobacillus crispatus* CTV-05 (Lactin-V), który stanowi obiecującą strategię w profilaktyce nawrotowego BV. Należy jednak zachować ostrożność w przenoszeniu wyników uzyskanych dla tego konkretnego preparatu na wszystkie dostępne probiotyki, ponieważ ich działanie nie musi być takie samo. W przyszłości leczenie nawrotowego BV może więc w większym stopniu uwzględniać złożone zależności zachodzące w obrębie ekosystemu pochwy. Rozwijające się metody diagnostyki molekularnej oraz terapie ukierunkowane na mikrobiotę stwarzają możliwość bardziej indywidualnego podejścia do

pacjenteK. Na obecnym etapie nie wszystkie z tych rozwiązań mają jednak wystarczające potwierdzenie w badaniach klinicznych, dlatego ich rzeczywiste miejsce w postępowaniu z BV wymaga dalszej oceny.

Bibliografia:

1. Bradshaw CS, Plummer EL, Mitchell CM, Fredricks DN, Herbst-Kralovetz MM, et al. Bacterial vaginosis. *Nat Rev Dis Primers*. 2025;11(1):43. doi:10.1038/s41572-025-00626-1. PMID:40537474.
2. Muzny CA, Balkus J, Mitchell C, Sobel JD, Workowski K, Marrazzo J, et al. Diagnosis and Management of Bacterial Vaginosis: Summary of Evidence Reviewed for the 2021 Centers for Disease Control and Prevention Sexually Transmitted Infections Treatment Guidelines. *Clin Infect Dis*. 2022;74(Suppl 2):S144-S151. doi:10.1093/cid/ciac021. PMID:35416968.
3. Coudray MS, Madhivanan P. Bacterial vaginosis—A brief synopsis of the literature. *Eur J Obstet Gynecol Reprod Biol*. 2020;245:143-148. doi:10.1016/j.ejogrb.2019.12.035. PMID:31901644.
4. Swidsinski S, Moll WM, Swidsinski A. Bacterial Vaginosis—Vaginal Polymicrobial Biofilms and Dysbiosis. *Dtsch Arztebl Int*. 2023;120(20):347-354. doi:10.3238/arztebl.m2023.0090. PMID:37097068.
5. Rosca AS, Castro J, Sousa LGV, Cerca N. Gardnerella and vaginal health: the truth is out there. *FEMS Microbiol Rev*. 2020;44(1):73-105. doi:10.1093/femsre/fuz027. PMID:31697363.
6. Sousa LGV, Pereira SA, Cerca N. Fighting polymicrobial biofilms in bacterial vaginosis. *Microb Biotechnol*. 2023;16(7):1423-1437. doi:10.1111/1751-7915.14261. PMID:37042412.
7. Ravel J, Gajer P, Abdo Z, Schneider GM, Koenig SSK, McCulle SL, et al. Vaginal microbiome of reproductive-age women. *Proc Natl Acad Sci U S A*. 2011;108(Suppl 1):4680-4687. doi:10.1073/pnas.1002611107. PMID:20534435.
8. Delgado-Diaz DJ, Tyssen D, Hayward JA, Gugasyan R, Hearps AC, Tachedjian G. Distinct immune-modulatory effects of lactic acid and short chain fatty acids produced by vaginal microbiota associated with bacterial vaginosis. *Front Immunol*. 2020;10:3036. doi:10.3389/fimmu.2019.03036. PMID:32038612.
9. Zheng N, Guo R, Wang J, Zhou W, Ling Z. Contribution of Lactobacillus iners to Vaginal Health and Diseases: A Systematic Review. *Front Cell Infect Microbiol*. 2021;11:792787. doi:10.3389/fcimb.2021.792787. PMID:34881196.
10. Carter KA, Fischer MD, Petrova MI, Balkus JE. Epidemiologic Evidence on the Role of Lactobacillus iners in Sexually Transmitted Infections and Bacterial Vaginosis: A Series of Systematic Reviews and Meta-Analyses. *Sex Transm Dis*. 2023;50(4):224-235. doi:10.1097/OLQ.0000000000001744. PMID:36729966.
11. Song SD, Acharya KD, Zhu JE, Deveney CM, Walther-Antonio MRS, Tetel MJ, et al. Daily Vaginal Microbiota Fluctuations Associated with Natural Hormonal Cycles, Efficacy of Oral Probiotics, and Chemokine Levels. *Front Cell Infect Microbiol*. 2020;10:354. doi:10.3389/fcimb.2020.00354. PMID:32793504.

12. Gustin AT, Thurman AR, Chandra N, Schifanella L, Alcaide M, Fichorova R, et al. Recurrent bacterial vaginosis following metronidazole treatment is associated with microbiota richness at diagnosis. *Am J Obstet Gynecol.* 2022;226(2):225.e1-225.e15. doi:10.1016/j.ajog.2021.09.018. PMID:34560047.
13. Vodstrcil LA, Plummer EL, Fairley CK, Hocking JS, Law MG, Petoumenos K, et al.; StepUp Team. Male-Partner Treatment to Prevent Recurrence of Bacterial Vaginosis. *N Engl J Med.* 2025;392(10):947-957. doi:10.1056/NEJMoa2405404. PMID:40043236.
14. Ma S, Wang W, Su Y, Sun W, Ma L. Antibiotics therapy combined with probiotics administered intravaginally for the treatment of bacterial vaginosis: a systematic review and meta-analysis. *Open Med (Wars).* 2023;18(1):20230644. doi:10.1515/med-2023-0644. PMID:37724125.
15. Javanbakht M, Ghasemi Tehrani H, Ardestani MS. The efficacy of probiotic supplementation for bacterial vaginosis: a systematic review and meta-analysis of randomized controlled trials. *Arch Gynecol Obstet.* 2023;308(2):413-424. doi:10.1007/s00404-023-06977-w. PMID:36877239.
16. Cohen CR, Wierzbicki MR, French AL, Morris S, Newmann S, Reno H, et al. Randomized Trial of Lactin-V to Prevent Recurrence of Bacterial Vaginosis. *N Engl J Med.* 2020;382(20):1906-1915. doi:10.1056/NEJMoa1915254. PMID:32402161.
17. Schwebke JR, Carter BA, Waldbaum AS, Agnew KJ, Paull JRA, Price CF, et al. A phase 3, randomized, controlled trial of Astodrimer 1% Gel for preventing recurrent bacterial vaginosis. *Eur J Obstet Gynecol Reprod Biol X.* 2021;10:100121. doi:10.1016/j.eurox.2021.100121. PMID:33537666.
18. Lev-Sagie A, Goldman-Wohl D, Cohen Y, Dori-Bachash M, Leshem A, Mor U, et al. Vaginal microbiome transplantation in women with intractable bacterial vaginosis. *Nat Med.* 2019;25(10):1500-1504. doi:10.1038/s41591-019-0600-6. PMID:31591599.
19. Muzny CA, Cerca N, Elnaggar JH, Taylor CM, Sobel JD, Van Der Pol B. State of the Art for Diagnosis of Bacterial Vaginosis. *J Clin Microbiol.* 2023;61(8):e0083722. doi:10.1128/jcm.00837-22. PMID:37199636.
20. Munch MM, Strenk SM, Srinivasan S, Fiedler TL, Proll S, Fredricks DN. Gardnerella Species and Their Association With Bacterial Vaginosis. *J Infect Dis.* 2024;230(1):e171-e181. doi:10.1093/infdis/jiae026. PMID:39052736.
21. Plummer EL, Vodstrcil LA, Doyle M, Daniell MS, Bodiyaabadu K, Murray GL, et al. Carriage of Gardnerella Subgroups in Men: Frequent Groin Colonisation and Concordance With Female Sexual Partners. *Front Cell Infect Microbiol.* 2022;12:872804. doi:10.3389/fcimb.2022.872804. PMID:35693481.
22. Armstrong E, Hemmerling A, Miller S, Burke KE, Newmann SJ, Morris SR, et al. Sustained effect of LACTIN-V (*Lactobacillus crispatus* CTV-05) on genital immunology following standard bacterial vaginosis treatment: results from a randomised, placebo-controlled trial. *Lancet Microbe.* 2022;3(6):e435-e442. doi:10.1016/S2666-5247(22)00043-X. PMID:35659905.
23. Plummer EL, Vodstrcil LA, Bradshaw CS. Unravelling the vaginal microbiome, impact on health and disease. *Curr Opin Obstet Gynecol.* 2024;36(5):338-344. doi:10.1097/GCO.0000000000000976. PMID:39109542.

24. O'Hanlon DE, Moench TR, Cone RA. Vaginal pH and microbicidal lactic acid when lactobacilli dominate the microbiota. *PLoS One*. 2013;8(11):e80074. doi:10.1371/journal.pone.0080074. PMID:24223212.
25. Machado A, Cerca N. Influence of biofilm formation by *Gardnerella vaginalis* and other anaerobes on bacterial vaginosis. *J Infect Dis*. 2015;212(12):1856-1861. doi:10.1093/infdis/jiv338. PMID:26080369.
26. Srinivasan S, Morgan MT, Fiedler TL, Djukovic D, Hoffman NG, Raftery D, et al. Metabolic signatures of bacterial vaginosis. *mBio*. 2015;6(2):e00204-15. doi:10.1128/mBio.00204-15. PMID:25873373.
27. George SD, Amerson-Brown MH, Sousa LGV, Rinehart AH, Tamhane A, Riegler AN, et al. Spatial organization of *Gardnerella* species, *Prevotella bivia*, and *Fannyhessea vaginae* in the bacterial vaginosis biofilm. *Infect Immun*. 2026;94(2):e00630-25. doi:10.1128/iai.00630-25. PMID:41568957.
28. American College of Obstetricians and Gynecologists. Concurrent sexual partner therapy to prevent bacterial vaginosis recurrence: Clinical Practice Update. *Obstet Gynecol*. 2025;146(6):e111-e114. doi:10.1097/AOG.0000000000006102. PMID:41100865.
29. World Health Organization. *Guidelines for the Treatment of Treponema pallidum, Chlamydia trachomatis, Neisseria gonorrhoeae, Trichomonas vaginalis, Candida albicans and Bacterial Vaginosis*. Geneva: World Health Organization; 2024. ISBN:978-92-4-009637-0.

11. ZWAPNIENIA POSTLAKTACYJNE PIERSI JAKO WYZWANIE DIAGNOSTYCZNE

Patrycja Zychowicz, Aleksandra Grzesiak, Łukasz Kwaśniak

Uniwersytet Jana Długosza

Collegium Medicum im. dr. W. Biegańskiego

Al. Armii Krajowej 13/15, 42-200 Częstochowa

E-mail: patrycja_zychowicz@o2.pl,
kwasniakukasz@gmail.com

aleksandragrzesiak2003@wp.pl,

Wiktor Wojciechowski

Akademia WSB w Dąbrowie Górniczej

ul. Cieplaka 1C, 41-300 Dąbrowa Górnicza

E-mail: wiktorkojciechowski433@gmail.com

Abstrakt Cięża, laktacja oraz następujący po nich okres inwolucji powodują istotne zmiany morfologiczne i czynnościowe w obrębie gruczołu piersiowego, które wpływają na jego obraz kliniczny i radiologiczny. Jednym z rzadziej opisywanych zjawisk jest pojawianie się nowych zwapnień w trakcie laktacji lub wkrótce po jej zakończeniu. Ich ocena może stanowić wyzwanie diagnostyczne, ponieważ część łagodnych zwapnień związanych ze zmianami laktacyjnymi może przypominać mikrozwapnienia występujące w przewodowym raku piersi in situ (ductal carcinoma in situ, DCIS). Celem pracy jest przedstawienie aktualnego stanu wiedzy dotyczącego mechanizmów powstawania zwapnień związanych z laktacją i okresem postlaktacyjnym, ich obrazu radiologicznego oraz możliwości różnicowania zmian łagodnych i podejrzanych o złośliwość. Omówiono znaczenie mammografii, cyfrowej tomosyntezy piersi i ultrasonografii, a także ograniczoną rolę rezonansu magnetycznego w ocenie mikrozwapnień. Przedstawiono również zasady oceny morfologii i dystrybucji zwapnień według systemu ACR BI-RADS® v2025 oraz znaczenie biopsji w diagnostyce zmian podejrzanych. Dostępne piśmiennictwo dotyczące bezpośrednio zwapnień postlaktacyjnych jest ograniczone i obejmuje przede wszystkim opisy przypadków oraz niewielkie serie kliniczne. Dane wskazują jednak, że zwapnienia związane ze zmianami laktacyjnymi mogą wykazywać morfologię naśladującą zmiany podejrzane, podczas gdy charakterystyczne zwapnienia warstwujące pozostają typową cechą zmian łagodnych. Niedawna laktacja nie powinna zatem stanowić samodzielnej podstawy do uznania nowych zwapnień za łagodne. Kluczowe znaczenie ma kompleksowa ocena ich morfologii, dystrybucji i dynamiki, porównanie z wcześniejszymi badaniami oraz w przypadku zmian podejrzanych, weryfikacja histopatologiczna z oceną zgodności radiologiczno-patologicznej. Prawidłowe postępowanie wymaga więc połączenia kontekstu postlaktacyjnego ze standardowymi kryteriami diagnostyki obrazowej piersi.

1. Wstęp

Gruczoł piersiowy w okresie ciąży i laktacji podlega znaczącym zmianom strukturalnym i czynnościowym. Pod wpływem zmian hormonalnych dochodzi do rozrostu struktur przewodowych i zrazikowych, rozwoju aparatu wydzielniczego oraz zwiększenia objętości tkanki gruczołowej. Po zakończeniu karmienia rozpoczyna się proces inwolucji,

obejmujący stopniową regresję aktywności wydzielniczej i przebudowę struktur gruczołowych [1-3]. Zmiany te mają istotne znaczenie w diagnostyce obrazowej. W okresie laktacji piersi stają się zwykle bardziej gęste mammograficznie, a obraz ultrasonograficzny i rezonansowy może różnić się od obrazu obserwowanego przed ciążą [1-3]. Aktualne zalecenia American College of Radiology podkreślają, laktacja ani okres bezpośrednio po niej nie stanowią przeciwwskazania do pełnej diagnostyki obrazowej, a niezbędnych badań nie należy odraczać [4]. Szczególne wyzwanie diagnostyczne stanowi identyfikacja nowo powstałych mikrozwapnień w okresie wygaszania laktacji. Choć zjawisko to w większości przypadków odzwierciedla łagodne procesy inwolucyjno-zastoinowe, jego obraz w mammografii cyfrowej (DM) oraz cyfrowej tomosyntezie piersi (DBT) potrafi do złudzenia imitować zmiany złośliwe [5, 6]. Kontekst ten komplikuje dodatkowo konieczność wykluczenia raka piersi powiązanego z ciążą (PABC, pregnancy-associated breast cancer), definiowanego jako rak rozpoznany w ciąży, w trakcie laktacji lub w okresie do 12 miesięcy po porodzie, który charakteryzuje się zazwyczaj wyższym stopniem złośliwości histologicznej i dynamicznym przebiegiem [2, 7].

2. Mechanizm powstawania i charakterystyka zwapnień postlaktacyjnych

Zwapnienia związane z laktacją są słabo poznanym zjawiskiem. Dostępne dane nie pozwalają wskazać jednego, jednoznacznie potwierdzonego mechanizmu ich powstawania [5,6]. W literaturze postuluje się kilka mechanizmów biofizycznych i biochemicznych, które należy traktować jako spójne hipotezy kliniczno-patologiczne, a nie dogmatycznie potwierdzone zjawiska:

- **Zastój pokarmu i precypitacja soli wapniowych:** Nagłe odstawienie karmień lub zablokowanie przewodów mlecznych prowadzi do stazy wydzieliny bogatej w kazeinę, laktozę oraz jony wapniowe i fosforanowe. W warunkach dehydratacji i wzrostu lokalnego pH dochodzi do przesycenia roztworu i wytrącania kryształów fosforanu wapnia oraz hydroksyapatytu w świetle przewodów i zrazików [5, 8].
- **Mikrotorbiele inwolucyjne i złuszczenie nabłonka:** Zanik komórek mioepitelialnych i zamknięcie mikroujść TDLU w procesie inwolucji sprzyjają formowaniu drobnych przestrzeni torbielowatych. Złuszczone, apoptotyczne komórki nabłonka wydzielniczego tworzą organiczny rdzeń, na którym dochodzi do mineralizacji [1, 6].
- **Martwica tkanki tłuszczowej i odczynny zapalny:** Przebyte epizody płożowego zapalenia piersi (mastitis), formowanie ropni lub mikrourazy mechaniczne indukowane odciąganiem pokarmu prowadzą do ogniskowej martwicy adipocytów. W procesie gojenia wolne kwasy tłuszczowe podlegają zmydlaniu z jonami Ca^{2+} dając początek obwodowym zwapnieniom dystroficznym [9, 10].

W klasycznych badaniach histopatologicznych Mercado i wsp. wykazali, że zwapnienia związane ze zmianami laktacyjnymi mogą lokalizować się zarówno w poszerzonych przewodach, jak i w zrazikach, przyjmując w mammografii podejrzany, heterogeny układ [5]. Z kolei Stucker i wsp. oraz Giron i wsp. udokumentowali przypadki obustronnych, nowych mikrozwapnień pojawiających się od 5 do 8 tygodni po zaprzestaniu laktacji, które w biopsji okazały się całkowicie łagodnymi zmianami zastoinowo-inwolucyjnymi [6, 7].

3. Zwapnienia warstwujące (layering calcifications) a specyfika laktacji

Jednym z najważniejszych punktów w diagnostyce różnicowej łagodnych zwapnień jest prawidłowe zdefiniowanie zjawiska sedymentacji wapnia w płynie. W aktualnej wersji ACR BI-RADS v2025, tradycyjne pojęcie milk of calcium („wapno w płynie”) zostało oficjalnie zastąpione deskryptorem zwapnienia warstwujące (layering calcifications) [8,14].

Patomechanizm zwapnień warstwujących polega na grawitacyjnym opadaniu mikroskopijnych kryształów soli wapnia na dno mikrotorbieli [15]. Kluczowe cechy tego zjawiska obejmują:

- Zależność od kąta wiązki promieniowania: W projekcji kranio-kaudalnej (CC, wiązka pionowa) zwapnienia te rzutują się jako okrągłe, amorficzne, słabo wysyczone plamki. W projekcji bocznej ścisłej (ML pod kątem 90°, wiązka pozioma) kryształy układają się w ostro odgraniczone linijne poziome, meniski lub półksiężyce, objaw ten określany mianem „filizanki herbaty” (teacup sign) [8, 15].
- Odrębność nozologiczna: Należy podkreślić, że layering calcifications nie są synonimem zwapnień postlaktacyjnych. Choć często powstają w torbielach inwolucyjnych po karmieniu, stanowią uniwersalny objaw łagodnych zmian torbielowatych i mogą występować u kobiet w każdym wieku, niezależnie od wywiadu położniczego [14, 15].

4. Diagnostyka obrazowa

4.1. Mammografia

Mammografia jest podstawową metodą oceny mikrozwapnień, ponieważ pozwala najlepiej ocenić ich morfologię i rozmieszczenie. Laktacja nie stanowi przeciwwskazania do wykonania mammografii, a współczesne zalecenia wskazują, że diagnostyka nie powinna być opóźniana z powodu karmienia piersią [4]. W przypadku zwapnień szczególne znaczenie mają dodatkowe projekcje powiększone oraz porównanie z wcześniejszymi mammogramami. Ocena powinna obejmować zarówno kształt poszczególnych zwapnień, jak i sposób ich rozmieszczenia.[8,16] W BI-RADS v2025 typowo łagodne zwapnienia obejmują m.in. zwapnienia skórne, naczyniowe, grube (coarse), duże pałeczkowate, okrągłe, obrączkowate (rim), warstwujące (layering) i związane z materiałem szewnym [8,14]. Do morfologii podejrzanych należą natomiast zwapnienia amorficzne, gruboziarniste heterogenne, drobne polimorficzne oraz drobne linearne lub linearno-rozgałęziające się [8,9].

4.2. Dystrybucja

Istotne znaczenie ma również rozmieszczenie zwapnień. BI-RADS v2025 wyróżnia dystrybucję rozlaną, regionalną, grupową, linearną i segmentalną [8,14]. Układ rozlany, szczególnie obustronny, częściej odpowiada zmianom łagodnym. Z kolei rozmieszczenie linearne lub segmentalne, zwłaszcza w połączeniu z podejrzaną morfologią, zwiększa prawdopodobieństwo procesu śródprzewodowego [8,9]. Nie oznacza to jednak, że określona dystrybucja pozwala samodzielnie rozpoznać raka. Właściwa interpretacja wymaga uwzględnienia wszystkich cech obrazu.[16,17]

4.3. Tomosynteza

Tomosynteza cyfrowa może poprawiać lokalizację zmian oraz ograniczać wpływ nakładania się tkanek. Ma szczególne znaczenie w diagnostyce zmian mammograficznych oraz jako metoda prowadzenia biopsji zwapnień niewidocznych w ultrasonografii [4]. W przypadku mikrozwapnień nie zastępuje jednak dokładnej oceny mammograficznej, zwłaszcza dodatkowych projekcji powiększonych.[16,17]

4.4. Ultrasonografia

Ultrasonografia ma duże znaczenie w diagnostyce piersi kobiet w ciąży i podczas laktacji, szczególnie w przypadku objawów klinicznych lub wyczuwalnej zmiany [1-4]. W odniesieniu do samych mikrozwapnień jej możliwości są jednak mniejsze niż mammografii. USG może być pomocne w identyfikacji masy lub innego korelatu dla zmiany mammograficznej oraz w prowadzeniu biopsji. Brak widocznego korelatu ultrasonograficznego nie wyklucza jednak DCIS, ponieważ zmiana może manifestować się wyłącznie mikrozwapnieniami.[3,4]

4.5. Dynamiczny rezonans magnetyczny piersi (DCE-MRI)

Rola DCE-MRI w diagnostyce mikrozwapnień jest ściśle ograniczona:

- Sole wapnia nie generują wolnych protonów i są diamagnetykami – MRI nie służy do obrazowania mikrozwapnień [1,3,4].
- W okresie postlaktacyjnym (nawet do kilku miesięcy po odstawieniu pokarmu) utrzymuje się nasilona perfuzja gruczołu, wywołująca silne tło wzmocnienia miększu (BPE, background parenchymal enhancement), co drastycznie zwiększa ryzyko wyników fałszywie dodatnich [1-4].
- Wskazaniem do MRI może być planowanie zabiegu oszczędzającego (BCT) w potwierdzonym histopatologicznie DCIS o wysokiej złośliwości, w celu wykluczenia wielośrodkowości procesu rozrostowego (ocena obszarów non-mass enhancement, NME) [18,19].

5. Różnicowanie zmian łagodnych i złośliwych

Tabela 1. Różnicowanie zwapnień piersi w okresie postlaktacyjnym na podstawie morfologii i dystrybucji przestrzennej, [5, 8-11, 13-15]

Rodzaj zwapnień / jednostka kliniczna	Morfologia	Dystrybucja przestrzenna	Znaczenie diagnostyczne
Zwapnienia warstwujące (layering / milk of calcium)	Okrągłe lub owalne w projekcji CC; w projekcji ML 90° przyjmują kształt półksiężyca lub menisku	Zgrupowana, regionalna lub rozlana	Typowo łagodne - BI-RADS 2. Charakterystyczne warstwowanie wynika z grawitacyjnej sedimentacji wapnia w torbielach.

Rodzaj zwapnień / jednostka kliniczna	Morfologia	Dystrybucja przestrzenna	Znaczenie diagnostyczne
Zwapnienia duże pałeczkowate / wydzielnicze	Grube, gładkościenne, ciągłe lub przerywane, często z centralnym przejaśnieniem	Przewodowa, często układająca się w kierunku brodawki	Typowo łagodne - BI-RADS 2. Związane przede wszystkim z ektazją przewodów i zaleganiem wydzieliny.
Martwica tłuszczowa / torbiel olejowa	Grube, dystroficzne; charakterystyczne obwodowe zwapnienia typu rim („skorupka jajka”)	Zwykle zgrupowana, w miejscu wcześniejszego urazu, zapalenia lub zabiegu	Typowo łagodne - BI-RADS 2, jeśli obraz jest charakterystyczny. W okresie laktacji może być następstwem urazu lub zapalenia piersi.
Zmiany włóknisto-torbielowate	Najczęściej drobne, okrągłe zwapnienia o regularnych zarysach	Zgrupowana lub rozlana	Zwykle łagodne - BI-RADS 2. W przypadku nietypowej morfologii lub współistnienia innych podejrzanych cech wymagana jest dalsza ocena.
Zwapnienia związane ze zmianami laktacyjnymi	Mogą być amorficzne, drobne, nieostro odgraniczone lub bardziej gruboziarniste; obraz może zmieniać się w czasie	Najczęściej zgrupowana lub regionalna	Mogą naśladować zwapnienia podejrzane, dlatego wymagają oceny morfologii, dystrybucji oraz porównania z wcześniejszymi badaniami. Kategoria BI-RADS zależy od całości obrazu.
Zwapnienia podejrzane o charakter złośliwy, w tym związane z DCIS	Drobne polimorficzne (fine pleomorphic), drobne linearne lub linearno-rozgałęziające się (fine linear / fine-linear branching)	Szczególnie podejrzana jest dystrybucja segmentalna lub linearna, odpowiadająca przebiegowi przewodów	Najczęściej BI-RADS 4-5, zależnie od morfologii i dystrybucji. Wymagają diagnostyki histopatologicznej. Mogą odpowiadać zwapnieniom związanym z DCIS.

Kluczowe znaczenie deskryptorów morfologicznych potwierdzają badania oparte na dowodach. W metaanalizie van Leeuwen i wsp. obejmująca 29 badań, wykazano w niej związek drobnych linearnych zwapnień z DCIS wysokiego stopnia, martwicą typu comedo oraz mikroinwazją. Dla związku z DCIS wysokiego stopnia pooled OR wynosił 4,92 (95% CI: 2,64-9,17). Autorzy jednocześnie wskazali na znaczne zróżnicowanie badań i wysokie

ryzyko błędu, dlatego wyniki należy interpretować jako wsparcie oceny ryzyka, a nie jako samodzielne kryterium rozpoznania [13].

Zwapnienia postlaktacyjne stanowią szczególne wyzwanie. Mercado i wsp. wykazali, że zwapnienia związane z histologicznie potwierdzonymi zmianami laktacyjnymi mogą mieć podejrzaną morfologię mammograficzną. Autorzy podkreślili znaczenie informacji o niedawnej laktacji dla korelacji obrazu radiologicznego z histopatologią, ale jednocześnie zalecili biopsję w przypadku podejrzanych cech morfologicznych [5].

6. Postępowanie kliniczne i znaczenie biopsji

W przypadku nowych zwapnień wykrytych po zakończeniu laktacji należy w pierwszej kolejności uwzględnić czas od zakończenia karmienia, wcześniejsze badania obrazowe, objawy kliniczne oraz indywidualne ryzyko raka piersi.[3,8] Kluczowe znaczenie ma porównanie z wcześniejszym mammogramem. Pojawienie się nowych zwapnień wkrótce po laktacji może być związane z fizjologiczną przebudową gruczołu, natomiast sama dynamika czasowa nie pozwala jednoznacznie rozstrzygnąć ich charakteru [5-7]. Jeżeli zwapnienia mają typowo łagodną morfologię, np. charakterystyczne warstwowanie odpowiadające zjawisku milk of calcium, dalsza diagnostyka inwazyjna nie jest konieczna [8,15]. W przypadku obrazu niejednoznacznego wskazane jest wykonanie dodatkowych projekcji mammograficznych, a w razie potrzeby uzupełnienie diagnostyki ultrasonograficznej lub tomosyntezy [1-4]. Jeżeli zwapnienia spełniają kryteria zmiany podejrzanej, należy postępować zgodnie z kategorią BI-RADS [8]. Dotyczy to również kobiet, które niedawno zakończyły laktację. Aktualne zalecenia ACR wskazują, że diagnostyka obrazowa oraz procedury biopsji mogą być wykonywane w okresie laktacji, jeśli istnieją ku temu wskazania kliniczne [4]. W przypadku zwapnień niewidocznych w badaniu ultrasonograficznym odpowiednią metodą uzyskania materiału może być biopsja stereotaktyczna lub biopsja pod kontrolą tomosyntezy. Jeżeli istnieje korelat ultrasonograficzny, możliwe jest pobranie materiału pod kontrolą USG [12]. Szczególne znaczenie ma zgodność radiologiczno-patologiczna. Jeżeli biopsja wykazuje zmianę łagodną, ale jej wynik nie wyjaśnia podejrzanego obrazu mammograficznego, nie należy uznawać diagnostyki za zakończoną. W takiej sytuacji konieczne może być ponowne pobranie materiału lub zastosowanie innej metody weryfikacji [8,12].

7. Różnice między zmianami łagodnymi i podejrzаныmi

Tabela 2. Cechy częściej przemawiające za łagodnym lub podejrzany charakterem zwapnień piersi, z uwzględnieniem ich morfologii, dystrybucji oraz kontekstu postlaktacyjnego [8-11,13,14]

Cecha	Częściej łagodna	Częściej podejrzana
Morfologia	okrągła, gruba, obrączkowata, warstwująca	amorficzna, gruboziarnista heterogenna, drobna polimorficzna, drobna linearna/linearno-rozgałęziająca się
Dystrybucja	rozłana, regionalna	linearna, segmentalna

Cecha	Częściej łagodna	Częściej podejrzana
Obustronność	częstsza	mniej typowa
Warstwowanie	typowe dla layering	brak charakterystycznego warstwowania
Związek czasowy z laktacją	może przemawiać za łagodnym podłożem	nie wyklucza nowotworu
Masa lub zaburzenie architektury	zwykle brak	może współistnieć
Wynik biopsji	łagodny i zgodny z obrazem	DCIS/rak lub wynik niezgodny z obrazem

8. Dyskusja

Zwapnienia postlaktacyjne są przykładem sytuacji, w której kontekst kliniczny może mieć dwojakie znaczenie w interpretacji mammografii. Informacja o niedawno przebytej laktacji pozwala uwzględnić łagodne przyczyny pojawienia się nowych zwapnień, jednak jednocześnie może prowadzić do ich zbyt łatwego przypisania zmianom związanym z karmieniem piersią. W konsekwencji istnieje ryzyko opóźnienia diagnostyki zmian o charakterze złośliwym [4-7]. W literaturze opisano przypadki nowych mikrozwapnień pojawiających się wkrótce po zakończeniu laktacji. Stucker i wsp. oraz Giron i wsp. przedstawili przypadki, w których zmiany te po wykonaniu biopsji okazały się łagodne [6,7]. Z kolei Mercado i wsp. zwrócili uwagę, że zwapnienia związane ze zmianami laktacyjnymi mogą mieć podejrzany obraz mammograficzny, mimo ich łagodnego charakteru w badaniu histopatologicznym [5]. Oznacza to, że niedawne karmienie piersią powinno być uwzględniane podczas interpretacji badania, ale samo w sobie nie jest wystarczającą podstawą do uznania nowych zwapnień za zmianę łagodną [5-7]. W ocenie mikrozwapnień istotne pozostają również ich cechy morfologiczne. W przypadku DCIS szczególne znaczenie przypisuje się drobnym zwapnieniom linearnym i linearno-rozgałęziającym się, które mogą częściej towarzyszyć zmianom o wysokim stopniu złośliwości, martwicy typu comedo oraz mikroinwazji [13]. W metaanalizie van Leeuwen i wsp. wykazano związek drobnych linearnych zwapnień z DCIS wysokiego stopnia; pooled OR dla tej zależności wyniósł 4,92 (95% CI: 2,64-9,17) [13]. Wynik ten należy jednak interpretować z uwzględnieniem heterogeniczności analizowanych badań i możliwego ryzyka błędu. Sama morfologia zwapnień nie pozwala więc na postawienie rozpoznania, ale może istotnie wpływać na ocenę prawdopodobieństwa złośliwości [13]. Wydaje się zatem, że zwapnienia pojawiające się po zakończeniu laktacji nie powinny być traktowane jako osobna kategoria diagnostyczna, w której można z góry odstąpić od standardowego postępowania. Aktualna klasyfikacja BI-RADS v2025 wprowadza również zmiany w nazewnictwie zwapnień. Określenie milk of calcium zostało zastąpione terminem layering, punctate włączono do kategorii round, natomiast zwapnienia określane wcześniej jako dystrophic zostały zaklasyfikowane do

kategorii coarse [8,14]. Zmiany te dotyczą przede wszystkim uporządkowania terminologii i nie zmieniają podstawowej zasady oceny zwapnień: w przypadku cech budzących podejrzenie konieczna jest dalsza diagnostyka [8,13,12]. Interpretację dostępnych danych ogranicza przede wszystkim niewielka liczba publikacji dotyczących bezpośrednio zwapnień postlaktacyjnych. Opisywane przypadki pochodzą głównie z opisów przypadków i małych serii, co nie pozwala na wiarygodne określenie częstości występowania tego zjawiska ani ryzyka współistnienia raka piersi [5-7]. W praktyce oznacza to konieczność indywidualnej oceny zmian, uwzględniającej nie tylko fakt niedawnej laktacji, ale również ich morfologię, wcześniejsze badania obrazowe oraz zgodność obrazu radiologicznego z wynikiem badania histopatologicznego. Niedawne karmienie piersią jest więc ważnym elementem kontekstu klinicznego, jednak nie powinno przesądzać o łagodnym charakterze podejrzanych zwapnień [4,5,8,12,13].

9. Wnioski

Zwapnienia pojawiające się podczas laktacji lub wkrótce po jej zakończeniu mogą być związane z łagodnymi procesami związanymi z involucją i zastojem, jednak ich obraz mammograficzny nie zawsze pozwala na jednoznaczne odróżnienie ich od zmian podejrzanych o złośliwość. W ocenie takich zmian szczególne znaczenie mają ich morfologia i dystrybucja oraz porównanie z wcześniejszymi badaniami obrazowymi. Sama informacja o niedawnym karmieniu piersią nie powinna być traktowana jako wystarczająca przesłanka do uznania zwapnień za łagodne. Jedną z bardziej charakterystycznych cech zmian łagodnych jest warstwowanie zwapnień (layering calcifications), związane z sedymentacją wapnia. Z kolei obecność zwapnień amorficznych, drobnych polimorficznych, drobnych linearnych lub linearno-rozgałęziających się, szczególnie w układzie liniowym lub segmentalnym, wymaga szczególnie wnikliwej oceny i nie powinna być automatycznie przypisywana zmianom postlaktacyjnym. Podstawową metodą oceny morfologii i dystrybucji zwapnień pozostaje mammografia. Ultrasonografia oraz tomosynteza mogą dostarczać dodatkowych informacji, natomiast rezonans magnetyczny ma ograniczoną przydatność w bezpośredniej ocenie mikrozwapnień. W przypadku zmian o podejrzanym charakterze konieczne jest uzyskanie rozpoznania histopatologicznego, a jego wynik powinien być oceniony w odniesieniu do obrazu radiologicznego. Ze względu na niewielką liczbę dostępnych badań dotyczących bezpośrednio zwapnień postlaktacyjnych potrzebne są dalsze obserwacje, które pozwolą lepiej określić częstość ich występowania, mechanizmy powstawania oraz optymalne postępowanie diagnostyczne. W praktyce klinicznej najważniejsze pozostaje zachowanie ostrożności diagnostycznej i unikanie uznawania podejrzanych zwapnień za łagodne wyłącznie na podstawie niedawno przebytej laktacji.

Bibliografia:

1. Rosas CHS, Góes ACA, Saltão LM, Tanaka AMS, Marques EF, Bitencourt AGV. Pregnancy-lactation cycle: how to use imaging methods for breast evaluation. *Radiol Bras.* 2020;53(6):405–412. doi:10.1590/0100-3984.2019.0071. PMID:33304009.
2. Langer AK. Breast Imaging in Pregnancy and Lactation. *Adv Exp Med Biol.* 2020;1252:17–25. doi:10.1007/978-3-030-41596-9_3. PMID:32816258.

3. Peterson MS, Gegios AR, Elezaby MA, et al. Breast Imaging and Intervention during Pregnancy and Lactation. *Radiographics*. 2023;43(10):e230014. doi:10.1148/rg.230014. PMID:37708073.
4. Dogan BE, Salkowski LR, Weinstein SP, et al. ACR Appropriateness Criteria® Breast Imaging During Lactation. *J Am Coll Radiol*. 2026;23(8):1768–1785. doi:10.1016/j.jacr.2026.03.002. PMID:41885663.
5. Mercado CL, Koenigsberg T, Hamele-Bena D, Smith JS. Calcifications associated with lactational changes of the breast: mammographic findings with histologic correlation. *AJR Am J Roentgenol*. 2002;179(3):685–689. doi:10.2214/ajr.179.3.1790685. PMID:12185045.
6. Stucker DT, Ikeda DM, Hartman AR, et al. New bilateral microcalcifications at mammography in a postlactational woman: case report. *Radiology*. 2000;217(1):247–250. doi:10.1148/radiology.217.1.r00oc19247. PMID:11012452.
7. Giron GL, Boolbol SK, Gross J, Cohen JM, Feldman S. Postlactational microcalcifications. *Breast J*. 2004;10(3):247–252. doi:10.1111/j.1075-122X.2004.21420.x. PMID:15125754.
9. Newell MS, Destounis SV, Leung JWT, DeMartini WB, Lee CH, Eby PR. *ACR BI-RADS® v2025 Manual*. Reston, VA: American College of Radiology; 2025.
10. Bilgen IG, Ustun EE, Memis A. Fat necrosis of the breast: clinical, mammographic and sonographic features. *Eur J Radiol*. 2001;39(2):92–99. doi:10.1016/S0720-048X(00)00303-X. PMID:11522417.
11. Kerridge WD, Kryvenko ON, Thompson A, Shah BA. Fat Necrosis of the Breast: A Pictorial Review of the Mammographic, Ultrasound, CT, and MRI Findings with Histopathologic Correlation. *Radiol Res Pract*. 2015;2015:613139. doi:10.1155/2015/613139. PMID:25861475.
12. Logullo AF, Prigenzi KCK, Nimir CCBA, Franco AFV, Campos MSDA. Breast microcalcifications: Past, present and future (Review). *Mol Clin Oncol*. 2022;16(4):81. doi:10.3892/mco.2022.2514. PMID:35251632.
13. Bick U, Trimboli RM, Athanasiou A, et al. Image-guided breast biopsy and localisation: recommendations for clinical practice. *Eur Radiol*. 2020;30(9):5210–5220. doi:10.1007/s00330-020-06897-z. PMID:32415555.
14. van Leeuwen MM, Doyle S, van den Belt-Dusebout AW, et al. Clinicopathological and prognostic value of calcification morphology descriptors in ductal carcinoma in situ of the breast: a systematic review and meta-analysis. *Insights Imaging*. 2023;14(1):213. doi:10.1186/s13244-023-01529-z. PMID:38051355.
15. Kang BJ. Breast Imaging Reporting and Data System v2025: Key Updates in Mammography. *J Korean Soc Radiol*. 2026;87(3):437–459. doi:10.3348/jksr.2026.0028. PMID:42306164.
16. Linden SS, Sickles EA. Sedimented calcium in benign breast cysts: the reassuring appearance of milk of calcium on horizontal-beam mammograms. *Radiology*. 1989;172(1):181–184. doi:10.1148/radiology.172.1.2740502. PMID:2740502.
17. Vashi R, Hooley R, Pinto R, Spangler P, Philpotts LE. Breast imaging of the pregnant and lactating patient: physiologic changes and common benign entities. *AJR Am J Roentgenol*. 2013;200(2):329–336. doi:10.2214/AJR.12.9846. PMID:23345353.

18. Weber BW, Mao L, Salem K, et al. Performance of Diagnostic Breast Imaging in Symptomatic Pregnant and Lactating Patients: Systematic Review and Meta-Analysis. *Radiol Imaging Cancer*. 2025;7(3):e240281. doi:10.1148/rycan.240281. PMID:40445098.
19. Kuhl CK, Schrading S, Bieling HB, et al. MRI for diagnosis of pure ductal carcinoma in situ: a prospective observational study. *Lancet*. 2007;370(9586):485–492. doi:10.1016/S0140-6736(07)61232-X. PMID:17693177.
20. Sardanelli F, Boetes C, Borisch B, et al. Magnetic resonance imaging of the breast: recommendations from the EUSOMA working group. *Eur J Cancer*. 2010;46(8):1296–1316. doi:10.1016/j.ejca.2010.02.015. PMID:20304629.

12. DŁUGODYSTANSOWY MARSZ A ZDROWIE I DOBROSTAN PSYCHICZNY

mgr Karolina Kocoł

badaczka niezależna

E-mail: kocoł.karolina@gmail.com

1. Wstęp

Długodystansowy marsz coraz częściej analizowany jest nie tylko jako forma aktywności fizycznej, pielgrzymowania czy turystyki, ale również jako doświadczenie związane ze zdrowiem i dobrostanem psychicznym [Collins-Kreiner, 2010; Mau, Aaby, Klausen i Roessler, 2021a]. Dotychczasowe badania wskazują między innymi na redukcję dystresu, pogłębioną autorefleksję, wzrost poczucia sprawczości oraz zmianę sposobu postrzegania własnych doświadczeń [Mau i in., 2021a; Mau, Klausen i Roessler, 2023]. Obraz ten nie jest jednak jednoznaczny, ponieważ publikacje różnią się zarówno stosowanymi metodami, jak i sposobem definiowania oraz pomiaru zdrowia i dobrostanu psychicznego.

Problem pojawia się już na poziomie samego pojęcia długodystansowego marszu. W literaturze używane są takie terminy jak *long-distance walking*, *long-distance hiking*, *thru-hiking*, *trekking* czy *pilgrimage*, które odnoszą się do wędrówek różniących się długością, charakterem i motywacją uczestników [Mau i in., 2021a]. Badania prowadzone są również na bardzo różnych trasach – od historycznych dróg pielgrzymkowych po szlaki o charakterze przyrodniczym. Mimo tych różnic w relacjach uczestników powtarzają się podobne doświadczenia psychologiczne i społeczne.

Większość publikacji koncentruje się jednak na pojedynczych szlakach i opisuje doświadczenia ich uczestników w konkretnym kontekście. Znacznie rzadziej porównuje się wyniki badań prowadzonych na różnych trasach oraz analizuje, które elementy wielodniowej wędrówki mogą mieć charakter wspólny. Celem niniejszego artykułu jest przegląd badań dotyczących związku długodystansowego marszu ze zdrowiem i dobrostanem psychicznym oraz identyfikacja powtarzających się komponentów tego doświadczenia.

2. Materiał i metody

Artykuł ma charakter przeglądu narracyjnego poświęconego związkowi długodystansowego marszu ze zdrowiem i dobrostanem psychicznym. Analizą objęto recenzowane publikacje naukowe dotyczące psychologicznych, społecznych i zdrowotnych aspektów wielodniowych wędrówek odbywanych na szlakach pielgrzymkowych, kulturowych i przyrodniczych.

Literaturę wyszukiwano w bazach Scopus i Web of Science oraz za pośrednictwem Google Scholar. Wykorzystano anglojęzyczne słowa kluczowe odnoszące się do różnych form długodystansowego marszu: *long-distance walking*, *long-distance hiking*, *thru-hiking*, *trekking* i *pilgrimage*. Łączono je z określeniami dotyczącymi zdrowia i dobrostanu

psychicznego, takimi jak *mental health*, *psychological well-being*, *well-being*, *self-reflection*, *nature connectedness* oraz *personal growth*.

Do przeglądu włączono publikacje opisujące doświadczenia osób uczestniczących w wielodniowych marszach oraz ich możliwe związki ze zdrowiem lub dobrostanem psychicznym. Ze względu na brak jednolitej definicji długodystansowego marszu uwzględniono badania dotyczące różnych form wędrówki, pod warunkiem że analizowana aktywność obejmowała wielodniowe przemieszczanie się pieszo. Pominięto natomiast prace koncentrujące się wyłącznie na fizjologicznych następstwach wysiłku fizycznego oraz publikacje, które nie odnosiły się do psychologicznego lub społecznego wymiaru wędrówki.

Zgromadzony materiał przeanalizowano jakościowo, porównując cele, metody oraz najważniejsze wyniki poszczególnych badań. Szczególną uwagę zwrócono na elementy doświadczenia powtarzające się w publikacjach dotyczących różnych rodzajów szlaków. Na tej podstawie wyodrębniono pięć obszarów: doświadczenie miejsca, wyjście poza codzienność i uproszczenie funkcjonowania, autorefleksję i nadawanie znaczenia doświadczeniom, pokonywanie wyzwań i budowanie poczucia sprawczości oraz relacje społeczne.

3. Wyniki i dyskusja

3.1. Długodystansowy marsz a zdrowie psychiczne – co pokazują dotychczasowe badania?

Na pierwszy rzut oka odpowiedź wydaje się prosta – większość publikacji wskazuje na korzystny związek długodystansowego marszu ze zdrowiem psychicznym uczestników. Bardziej szczegółowa analiza literatury pokazuje jednak, że obraz ten jest znacznie bardziej złożony. Poszczególne badania różnią się zarówno pod względem metodologii, jak i sposobu definiowania zdrowia oraz dobrostanu psychicznego, dlatego ich wyniki nie zawsze można bezpośrednio porównywać [Mau i in., 2021a].

Najbardziej spójne wnioski dotyczą redukcji dystresu psychicznego. W przeglądzie obejmującym 26 badań Mau i in. [2021a] wskazali, że właśnie w tym obszarze obserwowano największą zgodność wyników. Znacznie mniej jednoznaczne okazały się natomiast zależności dotyczące dobrostanu psychicznego. Wynikało to między innymi z różnic w sposobie jego definiowania i pomiaru w poszczególnych badaniach [Mau i in., 2021a].

Poza zmianami odnoszącymi się bezpośrednio do zdrowia psychicznego autorzy opisują również wzrost poczucia sprawczości, pogłębioną autorefleksję oraz zmianę sposobu postrzegania własnych doświadczeń [Dietrich, Joye i Garcia, 2015; Grocutt i Wood, 2025; Walter, 2022]. W części badań zwracano także uwagę na znaczenie relacji nawiązywanych podczas marszu, rozwój poczucia wspólnoty oraz większą otwartość na kontakt z innymi uczestnikami [Mayer i Lukács, 2021; Mróz, Roszak i Krogmann, 2026; Walter, 2022].

Jednocześnie literatura nie pozwala stwierdzić, że obserwowane zmiany wynikają wyłącznie z samego pokonywania długich dystansów. Podobne doświadczenia opisywano zarówno na historycznych szlakach pielgrzymkowych, jak i na trasach o charakterze przyrodniczym, różniących się stopniem trudności, otoczeniem oraz motywacją uczestników. Sugeruje to, że znaczenie mogą mieć nie tyle cechy konkretnego szlaku, ile określone

komponenty doświadczenia pojawiające się w różnych formach długodystansowego marszu [Mau i in., 2023].

To prowadzi do kolejnego pytania: jakie komponenty doświadczenia najczęściej pojawiają się w badaniach i w jaki sposób mogą być powiązane z obserwowanymi zmianami psychologicznymi?

3.2. Powtarzające się komponenty doświadczenia długodystansowego marszu

Mimo zróżnicowania badanych szlaków, uczestników i stosowanych metod w literaturze powtarzają się podobne opisy fizycznego, psychologicznego oraz społecznego wymiaru długodystansowego marszu. Autorzy rzadko wskazują jeden czynnik odpowiedzialny za obserwowane zmiany. Znacznie częściej opisują współwystępowanie elementów, które wzajemnie się uzupełniają [Grocutt i Wood, 2025; Mau i in., 2021a; Mau i in., 2023].

Na podstawie analizowanych publikacji wyodrębniono pięć komponentów: doświadczenie miejsca, wyjście poza codzienność i uproszczenie funkcjonowania, autorefleksję i nadawanie znaczenia doświadczeniom, pokonywanie wyzwań i budowanie poczucia sprawczości oraz relacje społeczne. Nie należy traktować ich jako odrębnych mechanizmów, lecz jako wzajemnie powiązane części całego doświadczenia długodystansowego marszu [Mau i in., 2021a; Mau i in., 2023].

3.2.1. Doświadczenie miejsca

Długodystansowy marsz zawsze odbywa się w określonej przestrzeni, jednak współczesne badania sugerują, że miejsce stanowi znacznie więcej niż jedynie tło podejmowanej aktywności. Coraz częściej zwraca się uwagę, że jego historia, kultura, symbolika oraz środowisko naturalne współtworzą sposób, w jaki uczestnicy przeżywają całe doświadczenie [Mau i in., 2023; Walter, 2022].

To spostrzeżenie wydaje się szczególnie interesujące, ponieważ badania prowadzone są na szlakach, które znacząco różnią się położeniem geograficznym, krajobrazem i historią. Obejmują zarówno drogi pielgrzymkowe, takie jak Camino de Santiago i Via Francigena, jak i trasy prowadzące przez historyczne i przyrodnicze krajobrazy, czego przykładem jest Inca Trail [Coghlan, 2014; Grocutt i Wood, 2025; Walter, 2022]. Mimo tych różnic uczestnicy opisują doświadczenia wykazujące wiele cech wspólnych. W badaniach powracają odniesienia do zmiany perspektywy, głębszej refleksji nad własnym życiem oraz poczucia czasowego oderwania od codziennego środowiska [Dietrich i in., 2015; Grocutt i Wood, 2025; Walter, 2022].

Najnowsze badania wskazują również, że poszczególnych elementów doświadczenia nie można całkowicie od siebie oddzielić. Johnmeyer, Xu, Wilhelm Stanis i Morgan [2025], analizując treści publikowane przez pielgrzymów w mediach społecznościowych oraz odpowiedzi na pytanie otwarte, zidentyfikowali osiem elementów Camino, które mogą sprzyjać doświadczeniu transformacyjnemu. Były to religia i duchowość, długodystansowy marsz, wspólnota, wyzwanie, prostota, kontakt z przyrodą, sztuka, historia i kultura oraz wielokulturowość. Autorzy podkreślają, że elementy te nie funkcjonują niezależnie, lecz łączą się ze sobą i wspólnie tworzą całe doświadczenie Camino.

Znaczenie miejsca widoczne jest również w badaniach prowadzonych poza Camino de Santiago. Grocutt i Wood [2025], analizując doświadczenia kobiet przemierzających Via Francigena, zwracają uwagę zarówno na pokonywanie kolejnych etapów, jak i na możliwość zanurzenia się w przestrzeni o bogatym dziedzictwie kulturowym i historycznym. Z kolei Coghlan [2014], przedstawiając autoetnograficzny opis wędrówki szlakiem Inca Trail, zwraca uwagę na znaczenie samej drogi prowadzącej przez historyczny krajobraz, a nie wyłącznie na osiągnięcie celu wyprawy.

Choć analizowane szlaki różnią się historią, krajobrazem i kulturą, doświadczenie miejsca konsekwentnie powraca jako jeden z ważnych komponentów długodystansowego marszu. Może to sugerować, że jego znaczenie nie wynika z pojedynczego elementu, lecz z połączenia środowiska naturalnego, dziedzictwa kulturowego, symboliki oraz osobistych znaczeń nadawanych przestrzeni przez uczestników. Dotychczasowe badania nie pozwalają jednak jednoznacznie określić, który z tych elementów odgrywa największą rolę w kształtowaniu zdrowia i dobrostanu psychicznego.

3.2.2. Wyjście poza codzienne środowisko życia i uproszczenie funkcjonowania

Wielodniowy marsz wiąże się z czasowym opuszczeniem dotychczasowego środowiska życia. Oznacza to nie tylko oddalenie od miejsca zamieszkania, ale również przerwanie codziennej rutyny oraz obowiązków zawodowych i rodzinnych. W literaturze podkreśla się, że właśnie ten aspekt odróżnia długodystansowy marsz od wielu innych form aktywności fizycznej i może tworzyć warunki sprzyjające zdrowiu i dobrostanowi psychicznemu [Mau i in., 2021a; Walter, 2022].

Jednym z najczęściej powracających motywów jest prostota codziennego funkcjonowania. Mau, Nielsen, Jakobsen, Klausen i Roessler [2021b], opisując doświadczenia uczestników wielodniowych marszów jako *mental movements*, zwracają uwagę, że codzienność zostaje ograniczona do podstawowych czynności – marszu, odpoczynku, przygotowania posiłku czy organizacji noclegu. Mniejsza liczba obowiązków i bodźców pozwala uczestnikom poświęcić więcej uwagi otaczającej przestrzeni, własnym emocjom i przeżywanym doświadczeniom. Zmiana rytmu życia i jego uproszczenie mogą dzięki temu sprzyjać wyciszeniu oraz refleksji.

Podobne obserwacje przedstawiają Grocutt i Wood [2025]. Uczestniczki przemierzające Via Francigena opisywały marsz jako możliwość spowolnienia tempa życia oraz czasowego uwolnienia się od codziennych ról i obowiązków. Pozwalało im to spojrzeć na własne życie z większego dystansu i ponownie zastanowić się nad swoimi priorytetami.

Na znaczenie zmiany codziennego kontekstu zwraca uwagę również Walter [2022], opisując doświadczenia pielgrzymów Camino de Santiago. Wielodniowy marsz tworzy swoistą przestrzeń przejściową (*liminal space*), w której uczestnicy funkcjonują poza dotychczasowym rytmem życia. Ograniczenie liczby codziennych decyzji oraz koncentracja na prostych i powtarzalnych czynnościach mogą sprzyjać wyciszeniu i większej gotowości do refleksji.

Znaczenie wydaje się mieć zatem nie tyle samo fizyczne oddalenie od miejsca zamieszkania, ile czasowa zmiana sposobu funkcjonowania. Opuszczenie codziennego środowiska, ograniczenie liczby bodźców i prostszy rytm dnia tworzą przestrzeń do

uważniejszego przeżywania marszu oraz refleksji nad własnym życiem. Podobne założenie pojawia się w koncepcji *being away* opisanej przez Kaplan i Kaplan [1989]. Zgodnie z nią opuszczenie znanego otoczenia może sprzyjać regeneracji zasobów poznawczych i zmianie perspektywy. Choć koncepcja ta nie odnosi się bezpośrednio do długodystansowego marszu, może stanowić punkt odniesienia dla interpretacji wyników współczesnych badań.

3.2.3. Autorefleksja i nadawanie znaczenia doświadczeniom

Wielodniowy marsz stwarza warunki sprzyjające zatrzymaniu się i spojrzeniu na własne życie z większego dystansu. W przeciwieństwie do codziennego funkcjonowania, w którym uwagę pochłaniają obowiązki i tempo życia, podczas wędrówki pojawia się przestrzeń na powrót do własnych myśli, wspomnień i doświadczeń. Refleksja nie jest przy tym przedstawiana jako pojedynczy moment czy bezpośredni efekt marszu. Badania sugerują raczej, że rozwija się stopniowo i stanowi część całego doświadczenia [Mau i in., 2021b; Walter, 2022].

Proces ten opisują badania Mau i in. [2021b]. Uczestnicy zwracali uwagę, że ograniczenie codziennych bodźców oraz długie godziny spędzane na marszu pozwalały im powracać do wcześniejszych wydarzeń, ponownie je analizować i stopniowo nadawać im nowe znaczenie. Wśród tematów wyodrębnionych przez autorów znalazły się *solitariness and reflection on oneself* oraz *calmness and embracing thoughts*. Wskazuje to, że autorefleksja może być integralną częścią długodystansowego marszu, a nie jedynie jego późniejszym następstwem [Mau i in., 2021b, s. 365].

Podobne obserwacje pojawiają się w badaniach prowadzonych na szlakach pielgrzymkowych. Uczestnicy Camino de Santiago opisywali wielodniową wędrówkę jako czas sprzyjający uporządkowaniu myśli, przewartościowaniu wcześniejszych doświadczeń i spojrzeniu na własne życie z nowej perspektywy [Walter, 2022]. Z kolei kobiety przemierzające Via Francigena zwracały uwagę, że czasowe wyjście poza codzienne role i funkcjonowanie w innym rytmie pozwalały im ponownie zastanowić się nad wcześniejszymi wydarzeniami, relacjami oraz planami na przyszłość [Grocutt i Wood, 2025].

Autorefleksja nie pojawia się zatem w oderwaniu od pozostałych komponentów długodystansowego marszu. Sprzyjają jej zmiana miejsca, odejście od codziennej rutyny oraz prostszy rytm funkcjonowania. Współwystępowanie tych elementów może tworzyć przestrzeń do ponownej interpretacji wcześniejszych doświadczeń i nadawania im nowych znaczeń [Mau i in., 2021b; Walter, 2022]. Proces ten może z kolei prowadzić do zmiany sposobu postrzegania własnych możliwości i stanowić punkt wyjścia do budowania poczucia sprawczości.

3.2.4. Pokonywanie wyzwań i budowanie poczucia sprawczości

Pokonywanie kolejnych kilometrów jest najbardziej widocznym elementem długodystansowego marszu. Badania sugerują jednak, że znaczenie może mieć nie tylko sam wysiłek fizyczny, ale również sposób radzenia sobie z trudnościami pojawiającymi się podczas wielodniowej wędrówki. Ich stopniowe przezwyciężanie może wzmacniać wiarę we własne możliwości i budować poczucie sprawczości [Mau i in., 2021b].

W badaniu Mau i in. [2021b] uczestnicy opisywali zmęczenie, niepewność i konieczność codziennego mierzenia się z nowymi sytuacjami jako źródła początkowego

obciążenia. Z czasem ich pokonywanie prowadziło jednak do wzrostu poczucia własnych możliwości. Autorzy określili ten proces jako przejście od obciążenia do poczucia zdolności do działania – *overcoming strain and achieving a sense of capability* [Mau i in., 2021b, s. 365]. Poczucie sprawczości nie pojawiało się więc dopiero po osiągnięciu końcowego celu, lecz rozwijało się wraz z kolejnymi etapami marszu.

Podobne znaczenie codziennego pokonywania trudności pojawia się w badaniach prowadzonych na szlakach pielgrzymkowych. Uczestnicy czerpali satysfakcję nie tylko z ukończenia całej trasy, ale również z przekraczania własnych ograniczeń i stopniowego zbliżania się do wyznaczonego celu [Grocutt i Wood, 2025; Walter, 2022]. Z kolei w badaniu programu *Warrior Hike*, skierowanego do weteranów odbywających sześciomiesięczną wędrówkę Appalachian Trail, w ich relacjach wyodrębniono takie tematy jak pozytywne zmiany życiowe, refleksja, wewnętrzny spokój i psychologiczne zdrowienie [Dietrich i in., 2015].

Budowanie poczucia sprawczości wydaje się zatem procesem rozwijającym się podczas całej wędrówki. Nie wynika wyłącznie z pokonania określonego dystansu ani z osiągnięcia końcowego celu, lecz z codziennego doświadczania własnej skuteczności w nowych i wymagających sytuacjach. Każdy ukończony etap może stanowić kolejne potwierdzenie własnych możliwości i stopniowo wpływać na sposób postrzegania siebie.

3.2.5. Relacje społeczne

Choć długodystansowy marsz często wiąże się z samotnością, nie musi oznaczać izolacji. Wielogodzinna wędrówka we własnym tempie sprzyja autorefleksji, ale równocześnie uczestnicy podkreślają znaczenie spotkań z osobami podejmującymi podobne wyzwanie. Nawet krótkotrwałe relacje mogą dawać poczucie wsparcia i zrozumienia wynikającego ze wspólnego doświadczenia drogi [Grocutt i Wood, 2025; Walter, 2022].

W relacjach kobiet przemierzających Via Francigena chwile spędzane w pojedynkę tworzyły przestrzeń do wyciszenia, natomiast kontakty z osobami napotkanymi na szlaku budowały poczucie przynależności [Grocutt i Wood, 2025]. Podobnie na Camino de Santiago relacje nawiązywały się spontanicznie i wynikały przede wszystkim ze współdzielenia doświadczenia, a nie z ról społecznych pełnionych w codziennym życiu [Walter, 2022].

Znaczenie relacji pojawia się również w badaniach długodystansowych wędrówców oraz uczestników programu *Warrior Hike*. W pierwszym przypadku uczestnicy wskazywali na poczucie przynależności do społeczności osób o podobnych wartościach, nie rezygnując przy tym z okresowego pozostawania samemu [Mayer i Lukács, 2021]. Weterani uczestniczący w programie *Warrior Hike* podkreślali natomiast znaczenie więzi powstających zarówno w grupie, jak i podczas spotkań z innymi osobami na Appalachian Trail [Dietrich i in., 2015]. Samotność i kontakt z innymi nie wykluczają się więc, lecz wspólnie kształtują doświadczenie długodystansowego marszu.

4. Wnioski

Przeprowadzony przegląd literatury pokazuje, że trudno wskazać jeden czynnik wyjaśniający związek długodystansowego marszu ze zdrowiem i dobrostanem psychicznym. Badania znacznie częściej opisują współwystępowanie wielu elementów, które wzajemnie się uzupełniają i wspólnie kształtują całe doświadczenie wędrówki.

Na podstawie analizowanych publikacji wyodrębniono pięć powtarzających się komponentów: doświadczenie miejsca, czasowe wyjście poza codzienność i uproszczenie funkcjonowania, autorefleksję i nadawanie znaczenia doświadczeniom, pokonywanie wyzwań i budowanie poczucia sprawczości oraz relacje społeczne. Elementy te pojawiały się na szlakach różniących się historią, krajobrazem i charakterem. Może to sugerować, że ich znaczenie nie wynika wyłącznie ze specyfiki konkretnej trasy, lecz również z samego charakteru wielodniowej wędrówki.

Długodystansowego marszu nie należy zatem rozpatrywać wyłącznie jako formy aktywności fizycznej czy turystyki. Jest to doświadczenie, w którym wysiłek fizyczny łączy się ze zmianą miejsca i rytmu życia, autorefleksją, pokonywaniem trudności oraz budowaniem relacji z innymi uczestnikami. To właśnie współdziałanie tych elementów może odróżniać długodystansowy marsz od wielu innych form aktywności podejmowanych w czasie wolnym.

Formułowanie jednoznacznych wniosków utrudniają jednak różnice w sposobie definiowania długodystansowego marszu i zdrowia psychicznego, a także zróżnicowanie stosowanych metod badawczych. Wiele dotychczasowych publikacji ma charakter jakościowy, koncentruje się na niewielkich grupach uczestników oraz dotyczy pojedynczych tras, przede wszystkim Camino de Santiago. Na ich podstawie nie można więc jednoznacznie potwierdzić zależności przyczynowej ani określić, jak długo utrzymują się opisywane zmiany.

Dalsze badania powinny obejmować porównanie doświadczeń uczestników różnych szlaków oraz pomiary prowadzone przed rozpoczęciem marszu, w jego trakcie i po zakończeniu wędrówki. Pozwoliłoby to lepiej określić, które komponenty mają charakter wspólny dla różnych tras, a które zależą od kulturowej, przyrodniczej i społecznej specyfiki konkretnego szlaku.

Bibliografia:

1. Coghlan A. (2014). An autoethnographic account of a walking pilgrimage on the Inca Trail: Exploring travel, transformation and meaning. *Tourism Recreation Research*, 39(2), s. 218–230.
2. Collins-Kreiner N. (2010). Researching Pilgrimage: Continuity and Transformations. *Annals of Tourism Research*, 37(2), s. 440–456.
3. Dietrich Z.C., Joye S.W., Garcia J.A. (2015). Natural Medicine: Wilderness Experience Outcomes for Combat Veterans. *Journal of Experiential Education*, 38(4), s. 394–406.
4. Grocutt S., Wood C. (2025). Walking with purpose: Eight solo women's pilgrimage hiking and wellbeing experiences on the Via Francigena. *Journal of Outdoor Recreation and Tourism*, 52, 100943.
5. Johnmeyer C., Xu S., Wilhelm Stanis S., Morgan M. (2025). The meaningful elements of the Camino: Toward understanding pilgrims' transformative experience. *Annals of Tourism Research Empirical Insights*, 6(2), 100201.
6. Kaplan R., Kaplan S. (1989). *The Experience of Nature: A Psychological Perspective*. Cambridge: Cambridge University Press.
7. Mau M., Aaby A., Klausen S.H., Roessler K.K. (2021a). Are Long-Distance Walks Therapeutic? A Systematic Scoping Review of the Conceptualization of Long-Distance

- Walking and Its Relation to Mental Health. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 18(15), 7741.
8. Mau M., Nielsen D.S., Jakobsen I.S., Klausen S.H., Roessler K.K. (2021b). Mental movements: How long-distance walking influences reflection processes among middle-age and older adults. *Scandinavian Journal of Psychology*, 62(3), s. 365–373.
 9. Mau M., Klausen S.H., Roessler K.K. (2023). Becoming a Person: How Long-Distance Walking Can Lead to Personal Growth – A Cultural and Health-Related Approach. *New Ideas in Psychology*, 68, 100975.
 10. Mayer K., Lukács A. (2021). Motivation and mental well-being of long-distance hikers: A quantitative and qualitative approach. *Heliyon*, 7(5), e06960.
 11. Mróz F., Roszak P., Krogmann A. (2026). Social, Health, and Religious Contexts of Caminophilia: Fascination and Attachment to the Camino de Santiago. *Journal of Religion and Health*. <https://doi.org/10.1007/s10943-026-02623-4>
 12. Walter O. (2022). Walking on the Camino Paths: A Spiritual and Biopsychosocial Journey. *International Journal of Religious Tourism and Pilgrimage*, 9(6), s. 26–33.



KONFERENCJE NAUKOWE

PIOTR RACHWAŁ

Jesteś studentem, doktorantem, młodym naukowcem? Chcesz publikować w profesjonalnym piśmie naukowym, brać udział w konferencjach? Firma Konferencje Naukowe Piotr Rachwał umożliwi Ci start w świecie nauki za przystępną cenę. Organizujemy konferencje interdyscyplinarne, jak i specjalistyczne. Wydajemy monografie pokonferencyjne oraz współpracujemy z czasopismami z listy ministerialnej. Pomagamy w publikacji artykułów.

Piotr Rachwał

Konferencje Naukowe

ul. Gen Leopolda Okulickiego 51D/20

31-637 Kraków

NIP: 573-272-51-36

REGON: 365643034

E-mail: rachwal.konferencjenaukowe@gmail.com

www.konferencjenaukowe.com.pl