

Z E S Z Y T Y

STUDENCKIEGO RUCHU NAUKOWEGO
UNIwersytetu JANA KOCHANOWSKIEGO W KIELCACH

F A S C I C L E S

OF STUDENT SCIENTIFIC MOVEMENT
THE JAN KOCHANOWSKI UNIVERSITY IN KIELCE



Z E S Z Y T Y

STUDENCKIEGO RUCHU NAUKOWEGO
UNIwersytetu JANA KOCHANOWSKIEGO W KIELCACH

ROK 2026 · TOM 35

CZĘŚĆ 2 (Nauki medyczne i o zdrowiu,
nauki ścisłe i przyrodnicze)

POD REDAKCJĄ
Joanny Rogalskiej



Redaktor naczelny: dr hab. prof. UJK Stanisław Cygan

Z-ca redaktora naczelnego: dr Tomasz Łączek

Sekretarz redakcji: dr Janusz Krywult

Członkowie Zespołu Redakcyjnego

dr Janusz Krywult

dr Joanna Rogalska

mgr Marzena Sochacka

mgr Marcin Walczak

dr Aneta Węgierek-Ciuk

dr hab. prof. UJK Artur Zieliński

dr Wojciech Trybus

Recenzenci

dr Janusz Krywult (UJK)

dr Joanna Rogalska (UJK)

dr Wojciech Trybus (UJK)

dr Aneta Węgierek-Ciuk (UJK)

dr Ewa Trybus (UJK)

Tłumaczenie

BERSAIL Sp. z o.o.

36-002 Jasionka, Jasionka 954E

Opracowanie redakcyjne, korekta i układ typograficzny

P.U. COMPUS

ul. Kopalnia 27, Starachowice, www.compus.net.pl

Projekt logo

Krzysztof Stefaniuk

Copyright © by Uniwersytet Jana Kochanowskiego w Kielcach, Kielce 2026

ISSN 2451-2036

Wydawca

Uniwersytet Jana Kochanowskiego w Kielcach

ul. Żeromskiego 5, 25-369 Kielce

Uniwersyteckie Centrum Nauki i Kultury UJK

ul. Ślaska 15, 25-328 Kielce

tel. +41 349 78 95

FASCICLES

OF STUDENT SCIENTIFIC MOVEMENT
THE JAN KOCHANOWSKI UNIVERSITY IN KIELCE

YEAR 2026 · VOLUME 35

PART 2 (Medical and health sciences,
natural sciences)

EDITED BY
Joanna Rogalska



Chief Editor: Stanisław Cygan, prof. (UJK)
Deputy Chief Editor: Tomasz Łączek, PhD
Secretary of the Editing Office: Janusz Krywult, PhD

Members of the Editorial Team

Janusz Krywult, PhD
Joanna Rogalska, PhD
Marzena Sochacka, MA
Marcin Walczak, MA
Aneta Węgierek-Ciuk, PhD
Artur Zieliński, prof. (UJK)
Wojciech Trybus, PhD

Review

Janusz Krywult, PhD (UJK)
Joanna Rogalska, PhD (UJK)
Wojciech Trybus, PhD (UJK)
Aneta Węgierek-Ciuk, PhD (UJK)
Ewa Trybus, PhD (UJK)

Translation

BERSAIL Sp. z o.o.
36-002 Jasionka, Jasionka 954E

Publication and copy Editor, proof-reading, typesetter

P.U. COMPUS
ul. Kopalnia 27, Starachowice, www.compus.net.pl

Project design

Krzysztof Stefaniuk

Copyright © by Uniwersytet Jana Kochanowskiego w Kielcach, Kielce 2026

ISSN 2451-2036

Publisher

Uniwersytet Jana Kochanowskiego w Kielcach
ul. Żeromskiego 5, 25-369 Kielce
Uniwersyteckie Centrum Nauki i Kultury UJK
ul. Śląska 15, 25-328 Kielce
tel. +41 349 78 95

Spis treści

Wprowadzenie	11
Wiktoria Bańka, Michał Maliszewski	
Składowanie dwutlenku węgla w warstwach skalnych w Polsce jako metoda walki z globalnym ociepleniem w ujęciu interdyscyplinarnym	15
Natalia Chlewicka, Natalia Woźniak	
Właściwości biologiczne oraz potencjał terapeutyczny probiotyków	25
Klaudia Kubicka	
Metale śladowe w miodach: kadm i miedź.....	33
Julia Rurik, Michalina Raczkowska	
Filtracja czy inkubacja? Ocena jakości mikrobiologicznej wody wodociągowej po zastosowaniu urządzeń filtrujących	43
Marcin Walas	
Analiza liniowych mostków cieplnych – połączenie okna z przegrodą zewnętrzną.....	53

Contents

Introduction	12
Wiktoria Bańska, Michał Maliszewski Geological Storage of Carbon Dioxide in Rock Formations in Poland as a Method of Mitigating Global Warming: An Interdisciplinary Approach	15
Natalia Chlewicka, Natalia Woźniak Biological Properties and Therapeutic Potential of Probiotics	25
Klaudia Kubicka Trace metals in honey: Cadmium and Copper	33
Julia Rurik, Michalina Raczkowska Filtration or Incubation? Assessment of the Microbiological Quality of Tap Water Following the Use of Filtration Devices	43
Marcin Walas Analysis of Linear Thermal Bridges: The Junction between a Window and an External Wall	53

Drogi Czytelniku,

przed Tobą druga część 35. tomu „Zeszytów Studenckiego Ruchu Naukowego Uniwersytetu Jana Kochanowskiego w Kielcach”, poświęcona naukom medycznym i o zdrowiu, naukom ścisłym oraz przyrodniczym. Zgromadzone w niej artykuły są efektem pracy młodych badaczy reprezentujących różne ośrodki akademickie i różne dyscypliny naukowe, ale łączy je wspólna cecha: poszukiwanie odpowiedzi na pytania istotne dla człowieka, środowiska i jakości życia.

W niniejszej części tomu znalazły się opracowania przygotowane przez studentów reprezentujących Uniwersytet Szczeciński, Uniwersytet Warmińsko-Mazurski w Olsztynie, Politechnikę Rzeszowską im. Ignacego Łukasiewicza oraz Uniwersytet Jana Kochanowskiego w Kielcach. Autorzy podejmują problematykę lokującą się na pograniczu nauk przyrodniczych, technicznych, medycznych i środowiskowych, co nadaje tej części tomu wyraźnie interdyscyplinarny charakter.

Pierwszy z tekstów dotyczy składowania dwutlenku węgla w warstwach skalnych w Polsce jako jednej z metod przeciwdziałania globalnemu ociepleniu. Ujęcie interdyscyplinarne, łączące perspektywę prawa, geologii i ochrony środowiska, pokazuje, że współczesne wyzwania klimatyczne wymagają nie tylko wiedzy specjalistycznej, lecz także zdolności do integrowania różnych perspektyw badawczych. Jest to przykład tematu, w którym nauka bezpośrednio styka się z praktyką społeczną, gospodarczą i regulacyjną.

Drugi tekst odnosi się do różnic w poziomie przeciwciał przeciwko *Lactocaseibacillus rhamnosus* GG pomiędzy pacjentami z chorobami reumatycznymi a zdrowymi dawcami krwi. Jest to przykład pracy sytuującej się na styku biologii, immunologii i nauk medycznych. Autorzy podejmują problem ważny dla rozumienia zależności między mikroorganizmami, układem odpornościowym i stanem zdrowia człowieka. Tego rodzaju badania pokazują, jak złożone są relacje zachodzące pomiędzy organizmem człowieka a mikroświatem biologicznym.

Trzeci artykuł poświęcony jest obecności metali śladowych w miodach, ze szczególnym uwzględnieniem kadmu i miedzi. Temat ten łączy chemię analityczną, bezpieczeństwo żywności, ekologię oraz troskę o jakość produktów naturalnych. Badanie składu pierwiastkowego miodu może być odczytywane nie tylko jako analiza konkretnego produktu spożywczego, ale również jako element szerszej refleksji nad stanem środowiska i konsekwencjami oddziaływania człowieka na przyrodę.

Kolejny artykuł podejmuje problem jakości mikrobiologicznej wody wodociągowej po zastosowaniu urządzeń filtrujących. Autorzy koncentrują się na pytaniu, czy filtracja rzeczywiście poprawia bezpieczeństwo użytkowania wody, czy też może wiązać się z ryzykiem mikrobiologicznym wymagającym dalszej kontroli. Tekst ten wpisuje się w ważny obszar badań nad zdrowiem publicznym, codziennymi praktykami gospodarstw domowych oraz bezpieczeństwem środowiska życia człowieka.

Tom zamyka opracowanie z zakresu inżynierii środowiska, dotyczące analizy liniowych mostków cieplnych w połączeniu okna z przegrodą zewnętrzną. Problematyka ta ma istotne znaczenie praktyczne, ponieważ dotyczy efektywności energetycznej budynków, komfortu cieplnego użytkowników oraz ograniczania strat energii. Artykuł pokazu-

je, że zagadnienia techniczne pozostają ściśle powiązane z problemami zrównoważonego rozwoju i odpowiedzialnego projektowania przestrzeni.

Zebrane w tej części tomu artykuły pokazują, że nauki medyczne, nauki o zdrowiu, nauki ścisłe i przyrodnicze nie funkcjonują w izolacji. Przeciwnie – wzajemnie się przenikają, tworząc obszar badań, w którym pytania o klimat, wodę, energię, zdrowie, odporność i bezpieczeństwo żywności stają się pytaniami o przyszłość człowieka oraz środowiska, w którym żyje. Właśnie ta interdyscyplinarność stanowi jedną z najważniejszych wartości prac publikowanych w niniejszym tomie.

Wyrażamy nadzieję, że prezentowane artykuły spotkają się z zainteresowaniem Czytelników, a dla młodych autorów staną się ważnym etapem w rozwijaniu samodzielności badawczej, krytycznego myślenia i odpowiedzialności za rzetelność naukowego opisu rzeczywistości. Studencki ruch naukowy odgrywa bowiem szczególną rolę: pozwala łączyć ciekawość poznawczą z pierwszym doświadczeniem publikacyjnym, a pasję badawczą z wymaganiami metodologicznymi właściwymi dla pracy naukowej.

Dziękujemy Autorom, Opiekunom naukowym, Recenzentom oraz wszystkim osobom zaangażowanym w przygotowanie tej części 35. tomu „Zeszytów Studenckiego Ruchu Naukowego UJK”. Dzięki ich pracy możliwe jest dalsze rozwijanie przestrzeni, w której młodzi badacze mogą prezentować wyniki swoich analiz, eksperymentów i obserwacji, a jednocześnie włączać się w szerszy obieg debaty naukowej.

Dear Reader,

The second part of Volume 35 of *Papers of Students' Scientific Movement of UJK in Kielce* presented here is devoted to medical and health sciences, as well as the exact and natural sciences. The articles it contains are the result of work by young researchers representing different academic institutions and disciplines. What unites them is the search for answers to questions of importance to people, the environment and quality of life.

This part of the volume includes studies prepared by students representing the University of Szczecin, the University of Warmia and Mazury in Olsztyn, Ignacy Łukasiewicz Rzeszów University of Technology, and Jan Kochanowski University of Kielce. The authors address topics at the intersection of the natural, engineering, medical and environmental sciences, giving this part of the volume a distinctly interdisciplinary character.

The first article examines the geological storage of carbon dioxide in rock formations in Poland as one means of mitigating global warming. Its interdisciplinary approach, combining perspectives from law, geology and environmental protection, demonstrates that contemporary climate challenges require not only specialist knowledge but also the ability to integrate different research perspectives. This is an example of a subject in which science intersects directly with social, economic and regulatory practice.

The second article examines differences in levels of antibodies against *Lactocaseibacillus rhamnosus* GG between patients with rheumatic diseases and healthy blood donors. This study lies at the intersection of biology, immunology and medical science. Its authors address an issue of importance to understanding the relationships between microorganisms, the immune system and human health. Research of this kind demonstrates the complexity of the interactions between the human body and the microbial world.

Third article on the presence of trace metals in honey samples, with particular emphasis on cadmium and copper. The subject combines analytical chemistry, food safety, ecology and concern for the quality of natural products. Analysis of the elemental composition of honey can be understood not only as the study of a particular food product but also as part of a broader reflection on the state of the environment and the consequences of human impact on nature.

The next article considers the microbiological quality of tap water following the use of filtration devices. The authors focus on whether filtration genuinely improves the safety of water use or may instead create a microbiological risk requiring further monitoring. The study contributes to an important area of research concerning public health, everyday household practices and the safety of the environments in which people live.

The volume concludes a study in environmental engineering analysing linear thermal bridges at window-to-external-wall junctions. This issue is of considerable practical importance because it concerns the energy efficiency of buildings, occupants' thermal comfort and the reduction of energy losses. The article demonstrates that technical questions are closely connected with sustainable development and responsible spatial design.

The articles collected in this part of the volume demonstrate that medical sciences, health sciences, exact sciences and natural sciences do not operate in isolation. On the contrary, they intersect to form a field of research in which questions concerning the climate, water, energy, health, immunity and food safety become questions about the future of hu-

manity and the environment in which we live. This interdisciplinarity is one of the principal merits of the studies published in the present volume.

We hope that these articles will be of interest to readers and will mark an important stage in the young authors' development of research independence, critical thinking and a sense of responsibility for producing reliable scholarly accounts of reality. The student scientific movement plays a distinctive role: it makes it possible to combine intellectual curiosity with the authors' first experience of publishing, and a passion for research with the methodological requirements of academic work.

We thank the authors, academic supervisors, reviewers and everyone involved in preparing this part of Volume 35 of *Papers of Students' Scientific Movement of UJK in Kielce*. Their work enables the continued development of a forum in which young researchers can present the results of their analyses, experiments and observations while also participating in wider scholarly debate.



Zeszyty Studenckiego Ruchu Naukowego
Uniwersytetu Jana Kochanowskiego w Kielcach, 2026, tom 35, część 2

Fascicles of Student Scientific Movement
the Jan Kochanowski University in Kielce, 2026, volume 35, part 2

WIKTORIA BAŃKA, MICHAŁ MALISZEWSKI

WIKTORIA BAŃKA

Studentka IV roku prawa, studia jednolite magisterskie,
Koło Naukowe Prawa Finansowego „FiskUS”

Fourth-year student of Law, long-cycle master's programme
“FiskUS” Financial Law Scientific Circle

MICHAŁ MALISZEWSKI

Student III roku geologii, studia I stopnia

Studenckie Koło Naukowe Geologów Uniwersytetu Szczecińskiego
Uniwersytet Szczeciński

Third-year student of Geology, first-cycle programme

Student Scientific Circle of Geologists at the University of Szczecin
University of Szczecin

Składowanie dwutlenku węgla w warstwach skalnych w Polsce jako metoda walki z globalnym ociepleniem w ujęciu interdyscyplinarnym

Geological Storage of Carbon Dioxide in Rock Formations in Poland as
a Method of Mitigating Global Warming: An Interdisciplinary Approach

Summary: Global warming caused by anthropogenic greenhouse gas emissions poses legal and environmental challenges worldwide. Poland's energy mix continues to rely heavily on fossil fuels, while decarbonisation is a long-term process. One potential solution is therefore the underground geological storage of carbon dioxide. The authors discuss the geological factors relevant to the safety of underground CO₂ storage and identify potential CO₂ storage sites in Poland. They also examine national and EU legislation governing the underground geological storage of CO₂ and the EU Emissions Trading System (EU ETS). In the final part of the article, the authors outline the principal challenges associated with implementing carbon capture and storage (CCS) technology and identify potential ways of addressing them, including expanding the range of permissible CO₂ storage sites and conducting public information campaigns. The methods employed in the study were a review of the relevant literature and doctrinal legal analysis.

Keywords: geology, global warming, CCS, financial law, ETS

Wstęp

Globalne ocieplenie, spowodowane m.in. emisją dwutlenku węgla (CO₂), jest powszechnie znanym problemem, który wiąże się z ogromnymi zagrożeniami dla wielu

dziedzin życia, takich jak rolnictwo (Zhang i inn. 2022, 907) czy zdrowie (Mucci i inn. 2023, 272).

W komunikacie Komisji Europejskiej (KE) (wtedy Komisja Wspólnot Europejskich) z dnia 10 stycznia 2007 r. pt.: *Ograniczenie globalnego ocieplenia do 2°C w perspektywie roku 2020 i dalszej* zakomunikowano, że w krajach rozwiniętych będzie konieczna redukcja wydzielania gazów cieplarnianych (GHG) o 30%, a potem o 60%-80% do 2050 r. w kontekście ograniczenia emisji GHG w skali światowej o połowę do 2050 r. Dodatkowo, KE wskazała, że korzyści z tego przedsięwzięcia będą o wiele większe niż koszty.

Jedną z propozycji redukcji emisji CO₂ jest powszechne korzystanie z odnawialnych źródeł energii (Cassia i inn. 2018, 8). Jednak, zanim będzie to możliwe, należy zminimalizować wypuszczanie CO₂ do atmosfery. Atrakcyjną propozycją w tym zakresie jest składowanie CO₂ w warstwach geologicznych, które spełniają określone warunki potrzebne do jego skutecznego zastosowania. Celem artykułu jest omówienie najważniejszych kwestii z perspektywy prawnej oraz geologicznej, które są konieczne dla wprowadzenia metody podziemnego zatłaczania dwutlenku węgla w Polsce.

Zatłaczanie dwutlenku węgla pod kątem geologicznym

Zatłaczanie dwutlenku węgla w formacjach skalnych jest metodą, która może być rozważana jako jedno z rozwiązań dla Polski. Wynika to z tego, że w polskim miksie energetycznym około 50% produkcji prądu w roku 2025 pochodzi ze spalania węgla brunatnego i węgla kamiennego (dane za: ARE). Tak duże spalanie paliw kopalnych wiąże się z emisją dwutlenku węgla, a co za tym idzie, opłatami w systemie ETS. Sprawia to, że zgodnie z dyrektywą Parlamentu Europejskiego i Rady 2009/31/WE metoda CCS (z ang. Carbon Capture and Storage) jest atrakcyjna jako metoda pomostowa w transformacji energetycznej oraz może być niezbędna dla niektórych branż, w których zeroemisyjność nie jest możliwa do osiągnięcia innymi metodami.

Warunki konieczne do skutecznego zastosowania CCS

Dwutlenek węgla na powierzchni ma gęstość około 1,96kg/m³ w temperaturze 20 stopni Celsjusza i przy standardowym ciśnieniu atmosferycznym (ok. 1013 hPa) (SP1, Końskie). Ze wzrostem temperatury i ciśnienia przy wtłaczaniu jego właściwości zaczynają się zmieniać. Optymalną formą skupienia CO₂ do składowania jest faza nadkrytyczna. Jest ona osiągana na poziomie ciśnienia wynoszącym 73,9 bara oraz w temperaturze 31,1 stopnia Celsjusza (Dubiński, 2014). W tym stanie dwutlenek węgla posiada cechy zarówno gazu: łatwo się rozprzestrzenia i wypełnia przestrzeń, jak i cieczy: jest o wiele gęstszy dzięki czemu większa jego ilość jest w stanie znaleźć się pod powierzchnią (Majewska, 2009). Taka sytuacja zapewnia korzyści zarówno ekonomiczne, jak i zwiększa bezpieczeństwo zbiornika, zmniejszając ryzyko ucieczki dwutlenku węgla. Dlatego też dolna granica dla zbiornika CO₂ jest określana właśnie przez moment przejścia w stan nadkrytyczny, który zachodzi na głębokości ok. 800-1000 m. Górna granica głębokości

takiego zbiornika wynika z aspektów ekonomicznych oraz właściwości samych zbiorników i wynosi ok. 3000-4000 m. Dodatkowo, miejsce składowania CO₂ musi się charakteryzować odpowiednią strukturą geologiczną, powinien występować naprzemieniony układ warstw porowatych oraz warstw nieprzepuszczalnych (Uliasz-Misiak, 2024, 64). Im większa liczba takich warstw w kompleksie, tym większy potencjał zbiornikowy. Dzieje się tak dzięki możliwości wypełniania zbiorników, zaczynając od najgłębszego ku górze. Taki układ zapewnia również większe zabezpieczenie przed ewentualnymi wyciekami (Pieńkowski, 2015, 51-53).

Bezpieczeństwo podziemnych składowisk dwutlenku węgla

Najważniejszą kwestią, dotyczącą podziemnego składowania dwutlenku węgla, jest jego wpływ na zdrowie i życie ludzi oraz na środowisko. Według wszelkich badań i analiz, metoda podziemnego składowania jest bezpieczna. Samo zatłaczanie CO₂ pod ziemię jest wykorzystywane do komercyjnych odwiertów podziemnych służących do wydobywania ropy naftowej lub gazu ziemnego. Warto dodać, że na świecie występują złoża, gdzie eksploatowany jest CO₂, a takimi złożami są np. złożo Mihalyi czy złożo Labarge. Prowadzi to do wniosku, że jeśli struktura geologiczna była odpowiednia do przechowywania węglowodorów lub samego CO₂ przez miliony lat, to także przy odpowiednio przeprowadzonym procesie zatłaczania nie dojdzie do żadnego wycieku gazu. (Wójcicki, 2013, 16). Dodatkowo, z każdym rokiem po zatłoczeniu dwutlenku węgla wzrasta jego bezpieczeństwo przechowywania w wyniku procesów fizycznych i chemicznych (Metz i in. 2005, 208). Instalacja potrzebna do zatłaczania zajmuje około 1ha terenu, a duża głębokość składowania sprawia, że nie ma przeciwwskazań do normalnego użytkowania gruntów (Pieńkowski, 2015, 53). Jedynym możliwym problemem mogłoby być wykorzystanie wód geotermalnych, jednak ze względu na duże zasolenie wód solankowych oraz niskich temperatur na głębokościach, na których możliwe jest składowanie dwutlenku węgla, w zdecydowanej większości przypadków jest to nieopłacalne (Górecki, 2006 a, b).

Z tego względu dwutlenek węgla jest możliwy do składowania w 3 przypadkach:

- 1) w poziomach solankowych występujących na głębokości ok. 1000 metrów z piaskowcami jako najczęstszymi skałami zbiornikowymi,
- 2) w złożach ropy i gazu o zróżnicowanym stopniu wyeksploatowania,
- 3) w pokładach węgla o znacznej głębokości zawierających metan (Wójcicki, 2013, 16-17).

Przykład możliwego składowania w Polsce

Obecnie obszary, na których dopuszcza się podziemne składowanie dwutlenku węgla, określa Rozporządzenie Ministra Środowiska z 3 września 2014 roku. Lista lokalizacji ogranicza się do jednej pozycji, w warstwach kambryjskich znajdujących się na Morzu Bałtyckim w wyłącznej strefie ekonomicznej Polski. Nie oznacza to jednak, że na terenie Polski występuje jedynie jedna lokalizacja o odpowiednich warunkach do składowania CO₂. Na czas pisania artykułu, czyli marzec 2026 roku, procedowane jest rozpo-

ządzenie Ministra Klimatu i Środowiska zmieniające rozporządzenie w sprawie obszarów, na których dopuszcza się lokalizowanie kompleksu podziemnego składowania dwutlenku węgla. Określa ono 18 obszarów o różnej genezie, w których możliwe jest składowanie CO₂. Obecnie najpełniejszym opracowaniem dotyczącym potencjalnych lokacji dla CCS jest „*Rozpoznanie formacji i struktur do bezpiecznego geologicznego składowania CO₂ wraz z ich programem monitorowania*” realizowany w latach 2008-2012 przez Państwowy Instytut Geologiczny – Państwowy Instytut Badawczy (PIG-PIB), Akademię Górniczo-Hutniczą (AGH), Główny Instytut Górnictwa (GIG), Instytut Nafty i Gazu (INiG), Instytut Gospodarki Surowcami Mineralnymi i Energią Polskiej Akademii Nauk (IGSMiE PAN) oraz Przedsiębiorstwo Badań Geofizycznych (PBG). To głównie na jego podstawie wskazano lokacje w tym rozporządzeniu. Można je podzielić na 4 typy: poziomy solankowe dolnokredowe, dolnojurajskie, kambryjskie, a także złoża węglowodorów. Warstwy, które są odpowiednie dla składowania CO₂, nie są jednorodne ze względu na skomplikowaną wgłębną budowę geologiczną Polski, co sprawia, że głównym kryterium staje się głębokość poniżej 900 metrów, a nie konkretny typ litostratygraficzny warstw.

Spośród trzech typów warstw niebędących złożami węglowodorów warto pokrótce scharakteryzować warstwy dolnojurajskie, które, ze względu na swoją litologię i kontekst stratygraficzny, stanowią idealny układ warstw do składowania CO₂. Większość obszaru Polski znajdowała się w tym okresie w systemie basenów środkowoeuropejskich. Cechą charakterystyczną tego okresu były cykle transgresywno-regresywne, które skutkowały naprzemienną sedymentacją piaskowców oraz iłowców/mułowców (Narkiewicz, 2020, 161-165). Sprawia to, że warstwy te są odpowiednie do składowania podziemnego dwutlenku węgla. Z tego względu dla elektrowni Bełchatów to w tych warstwach proponowano zlokalizowanie magazynu CO₂, dokładnie w antyklinie Zaosia (Budziszewicz) (Tarkowski, 2010, 119). W obrębie utworów Jury dolnej znajdują się 2 poziomy zbiornikowe: w Formacji Borucickiej oraz Formacji Komorowskiej. Najatrakcyjniejsza wydaje się Formacja Komorowska przykryta Formacją Ciechocińską, ponieważ poziom zbiornikowy dla Formacji Borucickiej zalega w niektórych miejscach dość płytko (ok. 550 do 750 m) (Tarkowski, 2010, 108-111).

Status prawny strumienia dwutlenku węgla

Podziemne składowanie dwutlenku węgla zostało unormowane w rozdziale 4a Ustawy Prawo geologiczne i górnicze (zwanej dalej PGG). Rozdział ten dodano w 2013 r. i miał on na celu implementację dyrektywy Parlamentu Europejskiego i Rady nr 2009/31/WE, która skupia się na redukcji emisji gazów cieplarnianych, w tym CO₂. Zgodnie z tą dyrektywą, wychwytywanie i podziemne składowanie CO₂ ma przyczynić się do złagodzenia zmian klimatycznych (Szalewska, 2015, art. 127a).

CO₂ staje się możliwe do składowania pod ziemią, gdy jest strumieniem dwutlenku węgla. Zgodnie z art. 127d ust. 2 PGG, strumieniem CO₂ są substancje, które powstają w procesie wychwytywania CO₂ i są prowadzone do podziemnego składowiska dwutlenku węgla. Wspomniane substancje muszą spełniać kryteria akceptacji składu CO₂, które określa koncesja (Szalewska, 2015, art. 127d). Ta akceptacja jest dokonywana na podstawie dwóch kryteriów. Pierwszym z nich jest skład procentowy, który uwzględnia mi-

nimalny poziom zawartości dwutlenku węgla oraz dopuszczalną ilość innych substancji i gazów. Drugim kryterium jest uwzględnienie parametrów CO₂, w tym ciśnienia i temperatury. Dodatkowo, na przedsiębiorcę zajmującego się składowaniem CO₂ nałożono obowiązek oceny ryzyka przed akceptacją składu strumienia dwutlenku węgla. Polega ona na wykazaniu, że stężenie innych substancji i gazów w składzie strumienia, przeznaczonego do składowania pod ziemią, nie zagrażają zdrowiu i życiu ludzi, ani środowisku (Szalewska, 2015, art. 127e).

Własność miejsca składowania CO₂

Gdy już wiadomo, jak zostało unormowane podziemne składowanie dwutlenku węgla i jakie wymagania muszą zostać spełnione, aby CO₂ stał się strumieniem dwutlenku węgla, powstaje pytanie, kto jest właścicielem tej przestrzeni. Na podstawie art. 6 ust. 1 pkt 5a PGG można dowiedzieć się, że podziemnym składowiskiem CO₂ jest część górotworu o określonej pojemności, która jest wykorzystywana w celu trwałego przechowywania CO₂ i jest połączona z powierzchniową instalacją zatłaczającą (Rakoczy, 2015, art. 10). Zgodnie z definicją *Słownika języka polskiego PWN górotwór* oznacza „zespół skał, w których prowadzone są roboty górnicze” (Dubisz, 2003). W art. 10 PGG określono, że część górotworu jest objęta własnością górniczą, gdy znajduje się poza granicami przestrzennymi nieruchomości gruntowej. Granice nieruchomości gruntowej uregulowano w art. 143 kodeksu cywilnego: „W granicach określonych przez społeczno-gospodarcze przeznaczenie gruntu własność gruntu rozciąga się na przestrzeń nad i pod jego powierzchnią. Przepis ten nie uchybia przepisom regulującym prawa do wód”. W tym przypadku kluczowe jest określenie głębokości własności nieruchomości gruntowej. Wyznacza ją społeczno-gospodarcze przeznaczenie prawa i w zależności od niego ocenia się, jak głęboko sięga własność nieruchomości gruntowej, a od jakiej głębokości rozpoczyna się własność górnicza. Wskazać należy, że podziemne składowanie CO₂ odbywa się na głębokościach ok. 1000 metrów. Na takim poziomie nie można mówić o wykazaniu celu społeczno-gospodarczego przez właściciela. Tym samym, części górotworu, które znajdują się na takiej głębokości, są uznawane za położone poza granicami przestrzennymi nieruchomości gruntowej. W konsekwencji stają się one własnością górniczą, a prawo własności górniczej przysługuje Skarbowi Państwa (Rakoczy, 2015, art. 10).

Przekazanie odpowiedzialności za podziemne składowisko dwutlenku węgla Krajowemu Administratorowi Podziemnych Składowisk Dwutlenku Węgla

Krajowy Administrator Podziemnych Składowisk Dwutlenku Węgla (KAPSDW), którego zadania powierza się PIG-PIB, ponosi odpowiedzialność za podziemne składowisko CO₂ w przypadku cofnięcia przez odpowiedni organ koncesji albo jej wygaśnięcie z powodu zrzeczenia się jej, śmierci przedsiębiorcy będącego osobą fizyczną lub likwidację przedsiębiorcy. Istotne jest, że z dniem przejęcia tej odpowiedzialności na rzecz Skarbu Państwa i bez odszkodowania zostaje przeniesiona własność nieruchomości, na której

zlokalizowano zakład górniczy, a także prawo własności zakładu górniczego. KAPSDW wstępuje w prawa oraz obowiązki wcześniejszego przedsiębiorcy, które wynikały z decyzji dotyczących prowadzenia zakładu górniczego. W związku z tym, ówczesny przedsiębiorca jest zobowiązany do jak najszybszego przekazania KAPSDW całej dokumentacji związanej z prowadzoną działalnością. Dodatkowo, organ koncepcyjny wydaje decyzję potwierdzającą przejście na własność Skarbu Państwa zakładu górniczego oraz prawo własności nieruchomości (Szalewska, 2015, art. 39a, 127j).

Na podstawie art. 127j PGG, KAPSDW przejmuje odpowiedzialność za zamknięte podziemne składowisko CO₂, gdy: „Zakład górniczy prowadzący podziemne składowanie dwutlenku węgla został zlikwidowany zgodnie z planem ruchu likwidowanego zakładu górniczego, zostały wypełnione warunki określone w koncesji na podziemne składowanie dwutlenku węgla”, zostały zrealizowane odpowiednie obowiązki związane z zabezpieczeniem finansowym, wskazane w art. 28a ust. 3 i 4 PGG, „został przeprowadzony monitoring kompleksu podziemnego składowania dwutlenku węgla po zamknięciu podziemnego składowiska dwutlenku węgla przez okres nie krótszy niż 20 lat, wykazana została długoterminowa stabilność kompleksu podziemnego składowania dwutlenku węgla, koncesja na podziemne składowanie dwutlenku węgla w łącznej ilości mniejszej niż 100 kiloton wygasła z powodu likwidacji przedsiębiorcy lub zrzeczenia się koncesji”.

Warunki te można pogrupować w dwie kategorie. Pierwszą z nich jest realizacja ustawowych i koncesyjnych obowiązków mających związek z eksploatacją podziemnego składowiska CO₂ i jego zamknięciem. Wypełnienie tej kategorii jest zależne od przedsiębiorcy.

Następną kategorią jest uzyskanie integralności kompleksu podziemnego składowania CO₂, potwierdzone odpowiednią dokumentacją. Spełnienie warunków drugiej grupy podyktowane jest czynnikami naturalnymi, przez co osiągnięcie wymaganego rezultatu nie jest pewne. W przypadku niespełnienia powyższych warunków organ koncesyjny jest zobowiązany odmówić przekazania odpowiedzialności KAPSDW. Warto dodać, że dla wydania decyzji w sprawie przekazania odpowiedzialności KAPSDW jest wymagane uzgodnienie z właściwym organem nadzoru górniczego oraz właściwym wójtem/burmistrzem/prezydentem miasta oraz, w przypadku składowania podziemnego CO₂ w łącznej ilości większej niż 100 kiloton, konieczne jest uzyskanie stanowiska KE (Szalewska, 2015, art. 127j).

System handlu przydziałami emisji gazów cieplarnianych w Unii Europejskiej

System handlu przydziałami emisji gazów cieplarnianych w UE (ETS) ustanawia Dyrektywa 2003/87/WE. Jest on oparty o rynek uprawnień do emisji gazów cieplarnianych i działa na zasadzie cap and trade. Oznacza to, że w ramach ETS wyznaczana się pulę uprawnień, które są przydzielane przedsiębiorstwom objętym ETS. Podmioty nabywają uprawnienia podczas aukcji, a jedno uprawnienie jest odpowiednikiem jednej tony dwutlenku węgla. Co ciekawe, te podmioty, które nie przekroczą swoich uprawnień, będą miały możliwość sprzedaży nadwyżki innym przedsiębiorstwom. Uprawnienia udostępniane na rynku są stopniowo zmniejszane, a ceny na rynku rosną, co ma na celu nacisk

na gospodarki Europejskiego Obszaru Gospodarczego na przejście na odnawialne źródła energii. (cire.pl, 2025; Business Insider, 2026; Czaplicki, 2017). Głównymi sektorami, które obejmuje system, są: sektor stali, cementu, przetwarzania gazu ziemnego i elektrownie konwencjonalne (Komisja Europejska, 2024, 6; Buduj z głową, 2025). Dodatkowo, ETS obejmuje linie lotnicze oraz właścicieli statków. Dochody ze sprzedaży uprawnień do emisji dwutlenku węgla w znacznej części trafiają do budżetu państwa. Powinny one zostać przeznaczone na czynności pozostające w związku z klimatem (Ministerstwo Rolnictwa i Rozwoju Wsi 2026). Pozostałe środki, które trafiają do Unii Europejskiej, są przeznaczane na wprowadzanie transformacji energetycznej oraz wzbogacając Fundusz Modernizacyjny i Fundusz Innowacyjny (biomasa 2026).

Państwa Członkowskie na podstawie Dyrektywy 2003/87/WE zostały zobowiązane do wyznaczenia kar za naruszenie przepisów krajowych dotyczących handlu emisjami gazów cieplarnianych. Rozdział 14 ustawy z dnia 12 czerwca 2015 r. o systemie handlu uprawnieniami do emisji gazów cieplarnianych (zwanej dalej UETS) został poświęcony administracyjnym karom pieniężnym. Zgodnie z art. 102 UETS, jeżeli przedsiębiorca działa bez wymaganego uprawnienia, grozi mu kara w wysokości 50 000 zł.

Brak opłat za ETS w przypadku CCS

Aby lepiej zrozumieć, dlaczego CCS jest dobrą propozycją, warto wiedzieć, że zgodnie z UETS, jako emisję rozumie się tylko gazy cieplarniane, które są wprowadzane do powietrza w wyniku działań człowieka i są związane z eksploatacją instalacji lub z wykonywaną operacją lotniczą. Dodatkowo, mając na uwadze Dyrektywę 2003/87/WE, w przypadku podziemnego składowania CO₂, nie powstaje obowiązek przedstawiania uprawnień do rozliczenia. Z tego wynika, że jeżeli wykorzystuje się technologię podziemnego składowania CO₂, unika się opłaty za ETS.

Podsumowanie i wnioski

Technologia CCS jest technologią istotną w kontekście walki z globalnym ociepleniem. Jest ona metodą przebadaną geologicznie. Jeśli składowisko znajduje się w odpowiednio przebadanej warstwie zbiornikowej z odpowiednim nadkładem, ryzyko związane z jego negatywnymi konsekwencjami jest znikome. Dodatkowo, w Polsce na różnych głębokościach znajdują się warstwy dolnokredowe, dolnojurańskie i kambryjskie, które spełniają wszystkie warunki potrzebne do odpowiedniego przechowywania CO₂. CCS nie ma też negatywnego wpływu na geotermię poza pojedynczymi miejscami w Polsce z powodu charakterystyki geotermalnej naszego kraju. Kolejnym potencjalnym problemem mogą być wycieki dwutlenku węgla wzdłuż szczelin uskokowych, jednak struktury geologiczne na obszarze Polski, w których dwutlenek węgla mógłby być składowany zgodnie z rozporządzeniem ministra, są pod tym kątem przebadane i nie wykazują takiego zagrożenia. Wpływ krótkoterminowy tej technologii jest nie do przecenienia dla krajów z dużym udziałem paliw kopalnych, takich jak Polska. Natomiast, długoterminowo jest niezbędna dla branż, w których eliminacja wytwarzania dwutlenku węgla jest utrud-

niona. Komunikat Komisji do Parlamentu Europejskiego, Rady, Europejskiego Komitetu Ekonomiczno-Społecznego i Komitetu Regionów w kierunku ambitnego przemysłowego zarządzania emisjami dwutlenku węgla w UE wskazuje branżę cementową jako branżę, dla której technologia podziemnego składowania jest nieodzowna.

Technologia CCS znajduje się w Projekcie Krajowego Planu w dziedzinie Energii i Klimatu do 2030 r. z perspektywą do 2040 r. Ministerstwo wskazuje w nim, że składowanie podziemne dwutlenku węgla jest „mniej narażone na ryzyko związane z surowcami krytycznymi niż inne technologie”. Jako wadę wskazano między innymi wysoki koszt początkowy takiej inwestycji. Jednak dzięki dotacjom z funduszy UE, takich jak Fundusz Modernizacyjny czy Innowacyjny, a także perspektywie uniknięcia opłat za ETS, powinno się zmotywować przedsiębiorców, a także instytucje państwowe do inwestycji w CCS. Warto zwrócić uwagę na to, że każdy projekt, który jest związany z głębokimi odwiertami, poszerza naszą wiedzę o budowie i przeszłości geologicznej danego obszaru, a co za tym idzie całej Polski. Sam projekt realizowany w latach 2008-2012 dostarczył ogromu informacji, dlatego ukierunkowanie badań na konkretne obszary powinno zaowocować pracami o dużej wartości naukowej.

Największymi problemami związanymi z projektami CCS w Polsce jest brak zaktualizowanej listy lokacji, w których dopuszcza się budowę projektów związanych z podziemnym składowaniem, a także niska świadomość społeczna odnośnie do zagrożeń, a raczej ich braku, związanych z tego typu inwestycjami. Autorzy liczą, że razem z wprowadzeniem nowej listy, która jest obecnie procedowana, ruszy kampania informacyjna, która będzie działać równolegle z pierwszymi wielkoskalowymi projektami składowisk. Z uwagi na wysoki poziom emisji CO₂ generowanych przez Elektrownię Bełchatów lokalizacja ta może być rozpatrywana jako jeden z najistotniejszych obszarów wdrażania technologii CCS w Polsce.

Bibliografia

- Cassia R., Nocioni M., Correa-Aragunde N., Lamattina L., 2018, *Climate Change and the Impact of Greenhouse Gases: CO₂ and NO_x Friends and Foes of Plant Oxidative Stress*, „Frontiers in plant science”, z. 9, s. 1-11.
- Czaplicki A., 2017 *Ewolucja unijnego systemu handlu uprawnieniami do emisji gazów cieplarnianych (EU ETS)*, „Polityka energetyczna – Energy Policy Journal” z. 2 s. 5-24.
- Dubiński J. Koteras A., 2014, *Możliwości składowania CO₂ w strukturach geologicznych*, „Energetyka”, s.1-11.
- Dubisz S. (red.), 2003, *Uniwersalny słownik języka polskiego*, Warszawa.
- Górecki W. (red.), 2006, *Atlas zasobów geotermalnych formacji mezozoicznej na Niżu Polskim*, Kraków.
- Górecki W. (red.), 2006b, *Atlas zasobów geotermalnych formacji paleozoicznej na Niżu Polskim*, Kraków.
- Komunikat Europejski, *Komunikat Komisji do Parlamentu Europejskiego, Rady, Europejskiego Komitetu Ekonomiczno-Społecznego i Komitetu Regionów w kierunku ambitnego przemysłowego zarządzania emisjami dwutlenku węgla w UE*, Strasburg.

- Komunikat Komisji Do Parlamentu Europejskiego, Rady, Europejskiego Komitetu Ekonomiczno-społecznego i Komitetu Regionów, w kierunku *ambitnego przemysłowego zarządzania emisjami dwutlenku węgla w UE*, 2024.
- Komunikat Komisji do Rady, Parlamentu Europejskiego, Europejskiego Komitetu Ekonomiczno-Społecznego oraz Komitetu Regionów, *Ograniczenie globalnego ocieplenia do 2°C w perspektywie roku 2020 i dalszej* {SEK(2007) 7} {SEK(2007) 8}.
- M. Szalewska, [w:] *Prawo geologiczne i górnicze. Komentarz*, red. B. Rakoczy, Warszawa 2015, art. 127(d). Pozyskano z <https://sip.lex.pl/#/commentary/587960117/757557/rakoczy-bartosz-red-prawo-geologiczne-i-gornicze-komentarz> (dostęp: 15.03.2026 r.)
- Majewska A. (red.), 2009, *Podziemne składowanie CO₂ – czym jest tak naprawdę?*, Warszawa.
- Metz B., Ogunlade D., Heleen de C., Manuela L., Leo M., 2005, *IPCC Special Report on Carbon Dioxide Capture and Storage*, Cambridge.
- Mucci S. V., Bafirman, Neldi, H., Syafrianto D., Rahman D., & Zarya F. 2023, *Global Warming Towards Human Health: A Literature Review*, „Jurnal Penelitian Pendidikan IPA”, z. 9, s. 267-274.
- Narkiewicz M., 2020, *Geologiczna historia Polski*, Warszawa.
- Pieńkowski G., 2015, *Geologiczne składowanie ditlenku węgla (CCS) jest metodą bezpieczną – dowody geologiczne*, „Przegląd Geologiczny”, z. 1, s. 48-54
- Projekt Krajowego Planu w dziedzinie Energii i Klimatu do 2030 r. z perspektywą do 2040 r., Ministerstwo Klimatu i Środowiska – scenariusz WAM
- Tarkowski R. (red.), 2010, *Potencjalne struktury geologiczne do składowania CO₂ w utworach mezozoiku niżu polskiego (charakterystyka oraz ranking)*, Kraków.
- Uliasz-Misiak B., 2024, *Geologiczne składowanie dwutlenku węgla - narzędzie łagodzenia globalnych zmian klimatu*. „Budownictwo. Technologie. Architektura”, s. 62–67.
- Wójcicki A. (red.), 2013, *Rozpoznanie formacji i struktur do bezpiecznego geologicznego składowania CO₂ wraz z ich programem monitorowania raport końcowy - segment I (regionalny)*, Warszawa.
- Zhang T., van der Wiel K. Wei T., Screen J., Yue X., Zheng B., Selten F., Bintanja R., Anderson W., Blackport R., Glomsrød S., Liu Y., Cui X., Yang X., 2022, *Increased wheat price spikes and larger economic inequality with 2° C global warming*, „One Earth”, z. 5, s. 907-916.

Akty prawne

- Dyrektywa 2003/87/We Parlamentu Europejskiego i Rady z dnia 13 października 2003 r. ustanawiająca system handlu przydziałami emisji gazów cieplarnianych w Unii oraz zmieniająca dyrektywę Rady 96/61/WE I, art. 16
- Dyrektywa parlamentu europejskiego i rady 2009/31/WE z dnia 23 kwietnia 2009 r. w sprawie geologicznego składowania dwutlenku węgla oraz zmieniająca dyrektywę rady 85/337/EWG, dyrektywy parlamentu europejskiego i rady 2000/60/WE, 2001/80/WE, 2004/35/WE, 2006/12/WE, 2008/1/WE i rozporządzenie (WE) nr 1013/2006, preambuła
- Rozporządzenie ministra środowiska z dnia 3 września 2014 r. w sprawie obszarów, na których dopuszcza się lokalizowanie kompleksu podziemnego składowania dwutlenku węgla, Dz. U z 2014 r. poz. 1272

Ustawa z dnia 12 czerwca 2015 r. o systemie handlu uprawnieniami do emisji gazów cieplarnianych, Dz. U. z 2015 r., poz. 1223 z późn zm. art. 3, 102

Ustawa z dnia 23 kwietnia 1964 r. Kodeks cywilny, Dz. U. 1964 Nr 16 poz. 93 z późn. zm., art. 143

Ustawa z dnia 9 czerwca 2011 r. Prawo geologiczne i górnicze, Dz. U. z 2011 r. Nr 163, poz. 981 z późn. zm., art. 6, 10, 28a, 39a, 127a, 127d, 127e, 127j

Źródła internetowe

Agencja Rynku Energii [https://www.are.waw.pl/badania-statystyczne/ prezentacja-wybranych-danych](https://www.are.waw.pl/badania-statystyczne/prezentacja-wybranych-danych) (dostęp 20.03.2026)

Biomasa <https://magazynbiomasa.pl/gdzie-trafiaja-pieniadze-za-emisje-co2-czyli-system-ets-w-nadwislanskich-realiach/> (18.03.2026)

Biuletyn Informacji Publicznej Ministerstwa Klimatu i Środowiska https://bip.mos.gov.pl/fileadmin/user_upload/bip/prawo/wykaz_prac_legislacyjnych/2025.09.10_Wykaz_prac_legislacyjnych_Ministra_Klimatu_i_Srodowiska.pdf (dostęp 20.03.2026)

Buduj z głową <https://bzg.pl/poradnik/arttykul/system-eu-ets-2-siega-po-budownictwo/id/59721> (dostęp 19.03.2026)

Business Insider Polska <https://businessinsider.com.pl/gospodarka/system-ets-jak-dziala-kto-na-nim-zyskuje-i-dlaczego-wywoљуje-emocje/04hq0zs> (dostęp: 18.03.2026)

Circle.pl Centrum Informacji o Rynku Energii <https://www.cire.pl/artykuly/serwis-informacyjny-cire-24/czym-jest-eu-ets-system-handlu-emisjami-w-unii-europejskiej> (dostęp: 18.03.2026)

Global CCS Institute <https://www.globalccsinstitute.com/> (dostęp 20.03.2026) Oficjalna strona internetowa Ministerstwa Rolnictwa i Rozwoju Wsi <https://www.gov.pl/web/rolnictwo/unijny-system-handlu-uprawnieniami-do-emisji> (dostęp: 18.03.2026)

Rządowe Centrum Legislacji https://legislacja.rcl.gov.pl/docs//574/12405451/13176701/13176702/dokument755_255.pdf (dostęp 20.03.2026)

Rządowe Centrum Legislacji <https://legislacja.rcl.gov.pl/projekt/12405451/katalog/13176701#13176701> (dostęp 20.03.2026)

SP1 Końskie <https://www.sp1konskie.pl/images/dokumenty/fizyka-not/TABLICE.pdf> (dostęp 30.05.2026)



Zeszyty Studenckiego Ruchu Naukowego
Uniwersytetu Jana Kochanowskiego w Kielcach, 2026, tom 35, część 2

Fascicles of Student Scientific Movement
the Jan Kochanowski University in Kielce, 2026, volume 35, part 2

NATALIA CHLEWICKA, NATALIA WOŹNIAK

Studentki III roku biologii, studia I stopnia
Studenckie Koło Naukowe Biotechnologów „Mikroby”
Uniwersytet Jana Kochanowskiego w Kielcach
Third-year students of Biology, first-cycle programme
“Mikroby” Student Scientific Circle of Biotechnologists
Jan Kochanowski University of Kielce

Właściwości biologiczne oraz potencjał terapeutyczny probiotyków Biological Properties and Therapeutic Potential of Probiotics

Summary: Rheumatic diseases comprise a group of more than 200 chronic inflammatory and autoimmune disorders of connective tissue, affecting the joints, spine and muscles and, in some cases, the internal organs. Studies on the role of the gut microbiome in the development of local and systemic inflammation indicate that probiotic bacteria may be involved in disease development. The aim of the study was to determine levels of antibodies against *Lactacaseibacillus rhamnosus* GG using an enzyme-linked immunosorbent assay (ELISA). Analysis of 290 samples revealed higher serum antibody levels in healthy blood donors than in patients with rheumatic diseases. Weak correlations were found between antibody levels and alcohol consumption, disease duration and age. The findings suggest reduced exposure to *Lactacaseibacillus rhamnosus* GG among patients with rheumatic diseases.

Keywords: probiotics, *Lactacaseibacillus rhamnosus* GG, ELISA, rheumatic diseases, gut microbiome

Wprowadzenie

Mikroorganizmy zasiedlają różne obszary ludzkiego organizmu, m. in. skórę oraz błony śluzowe. Szczególne znaczenie przypisuje się mikrobiocie jelitowej, która odgrywa istotną rolę w utrzymaniu homeostazy organizmu, regulacji odpowiedzi immunologicznej oraz zachowaniu integralności bariery nabłonkowej (Markowiak P, Śliżewska K., 2017). Wykazano, że mikrobiota jelitowa wpływa nie tylko na prawidłowe funkcjonowanie organizmu, ale również może uczestniczyć w patogenezie w chorobach autoim-

nologicznych. (Mohamed AH i inn., 2025) Choroby te są następstwem nieprawidłowego rozpoznawania własnych antygenów przez układ odpornościowy, co prowadzi do reakcji skierowanej przeciwko własnym komórkom i tkankom. Jednym z istotnych czynników związanych z rozwojem zaburzeń immunologicznych jest dysbioza jelitowa polegająca na zaburzeniu składu i proporcji mikroorganizmów zasiedlających jelita. Zaburzenie równowagi jelitowej może prowadzić do zwiększenia przepuszczalności błony śluzowej jelit oraz przedostawania się drobnoustrojów i ich antygenów do krwiobiegu, co sprzyja rozwojowi przewlekłego stanu zapalnego. Wśród czynników mogących przyczynić się do rozwoju dysbiozy wymienia się m.in. tj. dietę bogatą w tłuszcze, cukry i wysoko przetworzoną żywność, nadmierne stosowanie antybiotyków oraz predyspozycje genetyczne (Saran AB, 2025).

Znaczenie probiotyków w utrzymaniu homeostazy organizmu

1. Ogólna charakterystyka probiotyków

W ostatnim czasie trendy żywieniowe zwracają ku świadomemu dbaniu o zdrowie „od środka”. Nie mówi się już tylko o tym, że konkretne produkty żywieniowe są dla nas korzystne, ale również o realnym wpływie substancji zawartych w pokarmie na poszczególne procesy zachodzące w organizmie człowieka. Ekspertzy żywieniowi coraz częściej zwracają uwagę na szczególną rolę probiotyków w diecie oraz ich prozdrowotny wpływ na organizm (Markowiak P, Śliżewska K., 2017; Fang TE i inn., 2023).

Niektóre drobnoustroje zasiedlające układ pokarmowy ssaków wykazują działanie probiotyczne. Szacuje się, że przeciętny człowiek posiada ich od 1 do 2 kg, choć nowsze analizy wskazują, że rzeczywista wartość może być niższa i wynosić około 200-250 g zawartości okrężnicy (Kedia S, Ahuja V., 2023). Zgodnie z definicją WHO oraz FAO „probiotyki to żywe mikroorganizmy, które podawane w odpowiedniej ilości wywierają korzystny wpływ na zdrowie gospodarza” (Gałęcka M. i inn., 2018). W obrębie zagadnień związanych z probiotykami wyróżnia się również prebiotyki i synbiotyki (Markowiak P, Śliżewska K., 2017). W produkcji określanym mianem „probiotyku” zazwyczaj znajduje się od jednego do kilku wybranych szczepów mikroorganizmów (Markowiak P, Śliżewska K., 2017). Od 2007 roku Europejski Urząd do spraw Bezpieczeństwa Żywności stosuje koncepcję QPS (ang. *Qualified Presumption of Safety*) obejmującą listę mikroorganizmów uznanych za bezpieczne dla ludzi (Tab. 1) (Szydłowska A, Sionek B., 2022). Najczęściej wykorzystywane szczepy należą do rodzajów: *Lactobacillus*, *Bifidobacterium*, *Lactococcus*, *Streptococcus*, *Enterococcus*, *Bacillus* oraz *Saccharomyces* (Markowiak P, Śliżewska K., 2017). Żywe mikroorganizmy spełniające określone kryteria są wykorzystywane do produkcji żywności funkcjonalnej i konserwacji produktów spożywczych, a także w odbudowie naturalnej mikrobioty po antybiotykoterapii. Probiotyki tworzą warstwę ochronną dla nabłonka jelitowego poprzez wspomaganie produkcji immunoglobulin oraz aktywności fagocytozy (Szydłowska A, Sionek B., 2022). Mogą być również wykorzystywane w leczeniu ostrych biegunek, biegunek poantybiotykowych, biegunek podróżnych, zespołu jelita drażliwego oraz alergii pokarmowych (Szydłowska A, Sionek B., 2022).

Tabela 1. Wybrane mikroorganizmy posiadające status QPS (*Qualified Presumption of Safety*) stosowane w żywności funkcjonalnej i preparatach probiotycznych

Grupa	Rodzaj	Gatunek
Bakterie	<i>Lactobacillus</i>	<i>Lactobacillus rhamnosus</i>
Bakterie	<i>Lactobacillus</i>	<i>Lactobacillus plantarum</i>
Bakterie	<i>Lactococcus</i>	<i>Lactococcus lactis</i>
Bakterie	<i>Leuconostoc</i>	<i>Leuconostoc mesenteroides</i>
Bakterie	<i>Pediococcus</i>	<i>Pediococcus acidilactici</i>
Bakterie	<i>Bacillus</i>	<i>Bacillus subtilis</i>
Bakterie	<i>Bacillus</i>	<i>Bacillus licheniformis</i>
Drożdże	<i>Saccharomyces</i>	<i>Saccharomyces cerevisiae</i>
Drożdże	<i>Kluyveromyces</i>	<i>Kluyveromyces lactis</i>
Drożdże	<i>Debaryomyces</i>	<i>Debaryomyces hansenii</i>
Pleśnie	<i>Penicillium</i>	<i>Penicillium roqueforti</i>
Pleśnie	<i>Penicillium</i>	<i>Penicillium camemberti</i>
Inne	<i>Propionibacterium</i>	<i>Propionibacterium freudenreichii</i>
Mikroalgi	<i>Chlorella</i>	<i>Chlorella vulgaris</i>
Mikroalgi	<i>Arthrospira</i>	<i>Arthrospira platensis</i> (spirulina)

Prebiotyki nazywamy nietrawione składniki pożywienia, najczęściej błonnik, które stanowią pożywkę dla mikroflory jelitowej (Markowiak P, Śliżewska K., 2017). Naturalnie występują w owocach, warzywach oraz produktach zbożowych (Markowiak P, Śliżewska K., 2017). Mogą być również wytwarzane syntetycznie, np. jako laktuloza, galaktooligosacharydy, fruktooligosacharydy, maltooligosacharydy, cyklodekstryny, laktosacharoza. Ich głównym zadaniem jest stymulacja wzrostu oraz aktywności korzystnych bakterii zasiedlających przewód pokarmowy (Markowiak P, Śliżewska K., 2017).

Połączenie probiotyku z prebiotykiem jest określane mianem synbiotyku (Markowiak P, Śliżewska K., 2017). Stosuje się go w celu poprawy przeżywalności mikroorganizmów dodawanych do żywności oraz stymulacji proliferacji specyficznych rodzimych szczepów bakteryjnych zasiedlających układ pokarmowy (Markowiak P, Śliżewska K., 2017).

W 2008 roku zaproponowano nowe pojęcie – postbiotyki (Szydłowska A, Sionek B., 2022). Jest to bioaktywna substancja wytwarzana przez mikroorganizmy o działaniu probiotycznym (Szydłowska A, Sionek B., 2022). Mechanizm działania postbiotyków nie został dotychczas w pełni poznany, ponieważ granica między aktywnością probiotyków i postbiotyków nadal pozostaje niejednoznaczna. Wykazano jednak potencjalny prozdrowotny wpływ postbiotyku na organizm, obejmujący m.in. osłabienie procesu zapalnego,

ograniczenie rozwoju patogenów oraz stymulację układu odpornościowego (Szydłowska A, Sionek B., 2022).

2. Występowanie i zastosowanie probiotyków

Probiotyki są produktami szeroko dostępnymi na rynku. Można je znaleźć zarówno w przemyśle farmaceutycznym, jak również w wielu produktach spożywczych zawierających mikroorganizmy probiotyczne (Szydłowska A, Sionek B., 2022). Preparaty sklasyfikowane jako zawierające bakterie probiotyczne muszą zostać odpowiednio przebadane przed dopuszczeniem do stosowania u ludzi. Produkty lecznicze podlegają bardziej rygorystycznej kontroli, a nad ich produkcją i dystrybucją nadzór sprawuje Główny Inspektor Farmaceutyczny. Natomiast kontrola nie obejmuje produkcji i dystrybucji suplementów diety (Łoniewski I., 2021). Dodatkowo leki są objęte ścisłymi wymaganiami rejestracyjnymi potwierdzającymi ich jakość, skuteczność oraz bezpieczeństwo, a także podlegają stałemu monitorowaniu działań niepożądanych (Łoniewski I., 2021). Bakterie probiotyczne są obecne również w niektórych produktach spożywczych, których spożycie rekomendowane jest ze względu na potencjalne korzyści zdrowotne (Łoniewski I., 2021).

Istnieją różne metody stosowania probiotyków zależnie od potrzeb terapeutycznych. Najczęściej wyróżnia się drogi podania: doustną, dopochwową oraz miejscową (np. na skórę) (Łoniewski I., 2021). W przemyśle farmaceutycznym bakterie probiotyczne zazwyczaj występują w postaci suchej masy otrzymywanej w procesie liofilizacji, pakowanej do ampulek szklanych, fiolek, saszetek lub kapsułek wykonanych z celulozy lub żelatyny. Taki sposób przygotowywania bakterii uważany jest za najbardziej korzystny, ponieważ większość bakterii probiotycznych jest termolabilna. Z tego względu podczas produkcji zaleca się kontrolę warunków środowiskowych, utrzymując temperaturę ok. 20°C oraz wilgotność poniżej 30%. Do produkcji probiotyków wykorzystuje się szczepy bakterii, które są odporne na działanie składników soku żołądkowego lub stosuje się kapsułki wrażliwe na działanie pH jelit (Łoniewski I., 2021).

W żywności głównym źródłem bakterii probiotycznych są produkty uzyskiwane w procesie naturalnej fermentacji. Należy jednak podkreślić, że nie każdy produkt fermentowany może zostać uznany za probiotyk, ponieważ jego korzystne działanie powinno być potwierdzone badaniami naukowymi (Łoniewski I., 2021). Do najważniejszych grup produktów spożywczych zawierających bakterie probiotyczne zalicza się produkty mleczne oraz kiszonki (Łoniewski I., 2021). Wśród produktów mlecznych zawierających żywe kultury bakterii probiotycznych wymienia się kefiry, sery oraz jogurty naturalne (Łoniewski I., 2021). Do produktów niemlecznych należą m.in. kiszonki, takie jak kiszona kapusta, ogórki czy kimchi, a także produkty fermentowane otrzymywane z roślin strączkowych, głównie z soi, np. tempeh i miso (Vera-Santander VE, i inn., 2023).

3. Zasada działania probiotyków

3.1. Kolonizacja układu pokarmowego

Zasiedlanie jelit przez mikroorganizmy ma swój początek w momencie porodu i trwa do okresu dzieciństwa (Plaza-Diaz J. i inn., 2019). Proces ten regulowany jest przez wiele czynników, m.in.: konstytucję genetyczną noworodka, sposób porodu, stosowanie antybiotyków, rodzaj karmienia oraz stan zdrowia matki. Istotny wpływ na to zjawisko

może wywierać również stres (Plaza-Diaz J. i inn., 2019). Stosowanie probiotyków pomaga utrzymać odpowiednią proporcję między drobnoustrojami potencjalnie patogennymi a bakteriami niezbędnymi do prawidłowego funkcjonowania organizmu (Lebeer S. i inn., 2008). Równowaga ta zachowana jest dzięki występowaniu tzw. konkurencji ekologicznej (ang. *competitive exclusion*). Polega ona na rywalizacji między mikroorganizmami o ograniczone zasoby środowiska jelitowego, takie jak: miejsca adhezji na powierzchni nabłonka oraz dostępne składniki odżywcze (Plaza-Diaz J. i inn., 2019). Probiotyki, głównie bakterie z rodzajów *Lactobacillus* i *Bifidobacterium*, posiadają zdolność do przylegania do komórek nabłonka jelitowego dzięki obecności specyficznych struktur powierzchniowych, takich jak białka adhezyjne, kwasy lipotejhojowe czy polisacharydy (Latif A. i inn., 2023). Adhezja ta umożliwia im skuteczną kolonizację jelita i zajmowanie niszy ekologicznych, które w przeciwnym razie mogłyby zostać wykorzystane przez drobnoustroje potencjalnie chorobotwórcze (Plaza-Diaz J. i inn., 2019). W efekcie dochodzi do ograniczania możliwości osiedlania się i namnażania bakterii chorobotwórczych. Ponadto mikroorganizmy probiotyczne, takie jak: *Lactobacillus plantarum*, *Lactobacillus reuteri*, *Bifidobacterium adolescentis* i *Bifidobacterium pseudocatenulatum*, są naturalnymi producentami witamin z grupy B (Lebeer S. i inn., 2008). U pacjentów z celiakią szczepy bakterii produkujących maślan zostały przebadane pod kątem zdolności do stymulacji produkcji śluzu. Wszystkie analizowane szczepy wykazały zwiększoną produkcję śluzu oraz poprawę integralności bariery nabłonkowej (Plaza-Diaz J. i inn., 2019).

3.2. Immunomodulacja gospodarza oraz produkcja bakteriocyn

Probiotyki mogą modulować zarówno wrodzoną, jak i nabytą odpowiedź immunologiczną poprzez swoje metabolity, komponenty ściany komórkowej oraz materiał genetyczny, które są rozpoznawane przez wyspecjalizowane komórki immunokompetentne gospodarza wyposażone w odpowiednie receptory (Plaza-Diaz J. i inn., 2019).

Immunostymulujące działanie probiotyków przejawia się m.in. zwiększoną produkcją przeciwciał, nasileniem aktywności makrofagów i limfocytów oraz indukcją syntezy interferonu γ (Plaza-Diaz J. i inn., 2019). Kluczową rolę w kształtowaniu odpowiedzi immunologicznej odgrywają komórki nabłonka jelitowego oraz komórki układu odpornościowego związane z przewodem pokarmowym. Składniki ściany komórkowej bakterii kwasu mlekowego mogą stymulować aktywność makrofagów, co prowadzi do szybszej eliminacji drobnoustrojów dzięki zwiększonej produkcji wolnych rodników oraz enzymów lizosomalnych. (Plaza-Diaz J. i inn., 2019). Niektóre bakterie kwasu mlekowego i bifidobakterie mogą wytwarzać białkowe lub peptydowe substancje przeciwbakteryjne, określane mianem bakteriocyn, które hamują proliferację wybranych patogenów. Bakteriocyny są małymi cząsteczkami kationowymi oddziałującymi na błony cytoplazmatyczne bakterii (Plaza-Diaz J. i inn., 2019; Lebeer S. i inn., 2008).

Probiotyki mogą również pełnić funkcję antyalergiczną. Mechanizm ten polega na przywracaniu równowagi immunologicznej pomiędzy limfocytami T pomocniczymi Th1 i Th2 poprzez osłabienie odpowiedzi Th2 przy równoczesnym wspieraniu odpowiedzi Th1. Ponadto probiotyki modulują funkcję komórek dendrytycznych, które mogą indukować różnicowanie obwodowych limfocytów T regulatorowych (Treg), kontrolujących nadmierną odpowiedź immunologiczną. Dodatkowo poprawiają funkcje bariery śluzówkowej, tym samym zmniejszając przenikanie antygenów, jak również zwiększają pro-

dukcję wydzielniczej immunoglobuliny A (IgA) (wykluczają antygen ze śluzówki jelit), uczestniczą w degradacji antygenów dietetycznych oraz nasilają ekspresję cytokin przeciwzapalnych, takich jak IL-10 (Ahmad MF i inn., 2025).

3.3. Działanie przeciwnowotworowe

Probiotyki są rozpatrywane jako potencjalne wsparcie w terapii onkologicznej ze względu na ich zdolność do kształtowania składu mikrobioty jelitowej oraz modulowania odpowiedzi immunologicznej zarówno na poziomie lokalnym, jak i ogólnoustrojowym (Ahmad MF i inn., 2025; Yang Y. i inn., 2024). Wyniki badań wskazują, że mogą one ograniczać procesy inicjacji i progresji nowotworów, a także zmniejszać skłonność do tworzenia przerzutów w modelach eksperymentalnych obejmujących nowotwory indukowane chemicznie lub przeszczepione (Ahmad MF i inn., 2025; Yang Y. i inn., 2024). Działanie to obserwowano zarówno w przypadku nowotworów przewodu pokarmowego, jak i zmian zlokalizowanych poza jelitami (Ahmad MF i inn., 2025). Znaczenie przypisuje się oddziaływaniom pomiędzy probiotykami oraz wytwarzanymi przez nie metabolitami - takimi jak: bakteriocyny, peptydy, czy kwasy organiczne - a szlakami komórkowymi regulującymi proliferację, proces zapalny, apoptozę, angiogenezę oraz zdolność komórek nowotworowych do migracji i tworzenia przerzutów (Ahmad MF i inn., 2025). Mechanizmy przeciwnowotworowe obejmują m.in. zjawisko kompetycyjnego wykluczania drobnoustrojów patogennych, zwiększoną syntezę krótkołańcuchowych kwasów tłuszczowych, ograniczenie powstawania potencjalnie kancerogennych soli kwasów żółciowych, wiązanie mutagenów i karcynogenów oraz regulację ekspresji genów związanych z proliferacją i przeżywalnością komórek poprzez modulację szlaku NF- κ B, co sprzyja nasileniu procesów apoptotycznych (Ahmad MF i inn., 2025; Yang Y. i inn., 2024).

4. Rola probiotyków w chorobach autoimmunologicznych

4.1. Znaczenie mikrobioty jelitowej w chorobach autoimmunologicznych

Reumatoidalne zapalenie stawów (RZS) jest chorobą o podłożu autoimmunologicznym. Charakteryzuje się przewlekłym bólem stawów, ich obrzękiem oraz poranną sztywnością stawów. Przyczyna rozwoju tej choroby nie została dotychczas w pełni wyjaśniona, natomiast leczenie koncentruje się głównie na ograniczaniu procesu zapalnego w obrębie stawów, który stanowi główne źródło dolegliwości bólowych (Li W. i inn., 2024).

Mechanizmy patologiczne RZS nadal nie zostały w pełni poznane, jednak wykazano związek tej choroby z mikroflorą jelitową. U pacjentów cierpiących na zapalenie jelit zauważono większą podatność na rozwój RZS (Aleman RS, Yadav A., 2023). Co więcej, u chorych ze zdiagnozowanym reumatoidalnym zapaleniem stawów zauważono zmiany w mikroflore jelitowej w porównaniu do osób zdrowych. Zaobserwowano zmniejszoną liczbę bakterii kwasu mlekowego oraz bakterii z rodzaju *Bifidobacterium* i *Bacteroides*, natomiast zwiększoną liczbę bakterii z rodzajów *Enterococcus* i *Clostridium*, a także oportunistycznych patogenów należących do rodziny *Enterobacteriaceae* oraz rodzaju *Staphylococcus*. Dodatkowo enterobakterie wykryto w śluzówce nosa oraz moczu, co może sugerować translokację bakterii jelitowych do innych obszarów organizmu. (Li W. i inn., 2024)

4.2. Mechanizmy działania probiotyków w regulacji odpowiedzi immunologicznej

Zaobserwowano dwie główne drogi regulacji stanu zapalnego przez probiotyki: bezpośrednią oraz pośrednią. Mechanizm bezpośredni polega na oddziaływaniu probiotyków na określone komórki układu odpornościowego, takie jak makrofagi, komórki dendrytyczne (DCs, ang. *dendritic cells*), komórki NK (ang. *Natural Killers*), limfocyty T oraz limfocyty B. Wykazano również wpływ probiotyków na ekspresję receptorów PRR (ang. *pattern recognition receptors*) oraz zwiększenie różnicowania limfocytów B do plazmacytów wydzielających przeciwciała IgA. Mechanizmy te mogą przyczyniać się do odbudowy funkcji bariery jelitowej oraz ograniczenia adhezji bakterii patogennych do nabłonka jelitowego. Mechanizm pośredni związany jest z wytworzeniem przez bakterie probiotyczne metabolitów drobnoustrojowych, takich jak krótkołańcuchowe kwasy tłuszczowe (SCFA, ang. *Short-chain fatty acid*), tryptofan, adenozyń i histamina. Działanie to może ograniczać ryzyko penetracji bakterii patogennych do organizmu. Ponadto probiotyki stymulują produkcję śluzu oraz ekspresję białek tworzących połączenia ścisłe między komórkami nabłonka, wspomagając tym samym funkcjonowanie bariery jelitowej (Li W. i inn., 2024).

5. Podsumowanie

Probiotyki oraz prebiotyki mogą stanowić potencjalny element wspomagający terapię różnych schorzeń. Ich obecność może wpłynąć na przebieg i aktywność choroby (Mohamed AH i inn., 2025). Probiotyki uczestniczą w regulacji odpowiedzi immunologicznej w obrębie jelit, wspomagając prawidłową reakcję organizmu na bodźce środowiskowe oraz ograniczając ryzyko wystąpienia nieprawidłowych reakcji, w tym alergicznych i autoimmunologicznych [17]. Mogą również przyczyniać się do przywracania prawidłowej równowagi mikrobioty jelitowej oraz ograniczenia procesu zapalnego. Przyjmowanie probiotyków może łagodzić przebieg choroby, hamować rozwój jej wczesnych etapów oraz wspomagać odpowiednio dobraną terapię (Li W. i inn., 2024).

Bibliografia

1. Markowiak P., Śliżewska K., 2017, *Effects of probiotics, prebiotics, and synbiotics on human health*. „Nutrients”, 9(9), s. 1021.
2. Mohamed AH, Shafie A., Al-Samawi RI, et al., 2025, *The role of probiotics in promoting systemic immune tolerance in systemic lupus erythematosus*. Gut Pathogens, 17, s. 4-9.
3. Saran AB., 2025, *The role of gut microbiota in modulating immune responses: a systematic review on implications for autoimmune diseases*. „International Journal of Research in Medical Sciences”, 13(6), s. 2588-2595.
4. Fang TE, et al. *Global scientific trends on healthy eating from 2002 to 2021: a bibliometric and visualized analysis*. „Nutrients”. 2023;15(6), s. 1461.
5. Kedia S, Ahuja V., 2023, *Human gut microbiome: A primer for the clinician*. JGH Open. ;7(5), s. 370-378.

6. Gałęcka M., Basińska AM, Bartnicka A., 2018, *Probiotyki – implikacje w praktyce lekarza rodzinnego*, „Forum Medycyny Rodzinnej”, 2018;12(5), s. 233-240.
7. Szydłowska A., Sionek B., 2022, *Probiotics and postbiotics as functional food components affecting the immune response*, „Microorganisms”, 10(7), s. 1321.
8. Łoniewski I., 2021, *Probiotyki – jakość to skuteczność*, „Forum Medycyny Rodzinnej”, 15(3), s. 115-121.
9. Vera-Santander VE, et al., 2023, *Health benefits of consuming foods with bacterial probiotics, postbiotics, and their metabolites: a review*, „Molecules”, 28(3), s. 1230.
10. Plaza-Diaz J., et al., 2019, *Mechanisms of action of probiotics*, „Advances in Nutrition”, 10(Suppl_1), s. 49-66.
11. Lebeer S., Vanderleyden J., De Keersmaecker SCJ., 2008, *Genes and molecules of lactobacilli supporting probiotic action*. „Microbiology and Molecular Biology Reviews”, 72(4), s. 728-764.
12. Latif A., et al. *Probiotics: mechanism of action, health benefits and their application in food industries*, 2023, „Frontiers in Microbiology”, 14:1216674.
13. Ahmad MF, et al., 2025, *Probiotics and cancer: mechanistic insights and organ-specific impact*, „Biomolecules”, 15(6), s. 879.
14. Yang Y., et al. *Rheumatoid arthritis and the intestinal microbiome: probiotics as a potential therapy*. „Frontiers in Immunology”. 2024;15:1331486.
15. Li W., et al., 2024, *Quality of evidence supporting the role of probiotics for rheumatoid arthritis: an overview of systematic reviews*, „Frontiers in Immunology”, 15:1397716.
16. Aleman RS, Yadav A., *Systematic review of probiotics and their potential for developing functional nondairy foods*, 2023, „Applied Microbiology”, 2023;4(1), s. 47-69.



KLAUDIA KUBICKA

Studentka I roku chemii, studia II stopnia
Studenckie Koło Naukowe „Kalcyt”
Uniwersytet Jana Kochanowskiego w Kielcach
First-year student of Chemistry, second-cycle programme
“Kalcyt” Student Scientific Circle
Jan Kochanowski University of Kielce

Metale śladowe w miodach: kadm i miedź

Trace metals in honey: Cadmium and Copper

Summary: Honey has long been used in medicine and cooking. It has numerous health-promoting properties and contains important micronutrients and trace elements, including copper (Cu), which performs essential functions in the human body. Copper is a component of numerous enzymes involved in redox reactions, iron metabolism, connective tissue synthesis, and the functioning of the nervous and immune systems. It also plays a major role in various physiological processes. However, environmental pollution may cause honey to contain toxic elements such as cadmium, which exhibits carcinogenic properties. The study presented in the article involved the mineralisation of different honey samples and the determination of copper and cadmium concentrations using atomic absorption spectrometry (AAS). The results show that cadmium was detected in 67% of the honey samples, with a mean concentration of 54.86 µg/kg. Copper was quantified in all the samples, with a mean concentration of 592.52 µg/kg.

Keywords: honey, cadmium, copper, AAS

Wprowadzenie

Miód jest naturalnym pokarmem używanym w codziennym życiu przez wielu ludzi na świecie. Produkowany jest przez pszczoły miodne z nektarów kwiatów oraz wydzielin drzew i roślin dających miód nektarowy lub spadź (Vġjan i in., 2023). Składa się głównie z fruktozy i glukozy, zawiera również fruktooligosacharydy, wiele aminokwasów, witamin, minerałów i enzymów. Istnieje ponad 320 rodzajów miodów, a ich skład może się różnić w zależności od odmiany rośliny oraz jej środowiska rozwoju (Vġjan i in., 2023; Eteraf-Oskouei i Najafi, 2013). Miód już w najstarszych cywilizacjach był stosowany w celach medycznych. Obecnie jest wysoko ceniony między innymi za jego właściwości antybakteryjne, ponieważ posiada związki bioaktywne wykorzystywane w przypadku za-

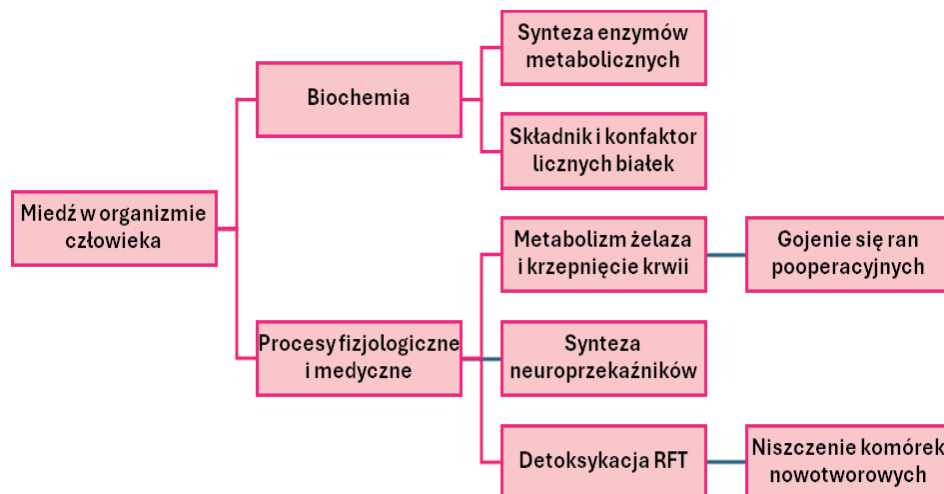
każeń wywołanych przez bakterie lekooporne, takie jak *Pseudomonas aeruginosa*, *Staphylococcus aureus* i *Klebsiella pneumoniae* (Poulsen-Silva i in., 2023). Badania wykazały, że miód ma działanie hamujące na aż 60 gatunków bakterii, niektóre gatunki grzybów i wirusów. Ze względu na swoje właściwości antyoksydacyjne, wynikające z szerokiej gamy związków obecnych w ich składzie, miody wykorzystywane są w wielu schorzeniach (Bereksi-Reguig i in., 2022). Przykładem może być leczenie zapalenia okrężnicy, gdzie skuteczność działania miodu można porównać z prednizolonem, silnym lekiem zalecanym w terapii tego schorzenia (Eteraf-Oskouei i Najafi, 2013). Dostępne w literaturze badania również wskazują na możliwość wykazywania przez miód działania przeciwzapalnego oraz stymulowania reakcji immunologicznych w ranie. Obecnie miód jest także wykorzystywany w leczeniu i ochronie przed zakażeniami żołądkowo-jelitowymi, między innymi w zapaleniu błony śluzowej żołądka, zapaleniu dwunastnicy i owrzodzeniu żołądka, wywołanymi przez bakterie i rotawirusy. Zaobserwowano możliwość stosowania go w leczeniu chorób wątroby oraz schorzeń układu sercowo-naczyniowego i układu pokarmowego (Eteraf-Oskouei i Najafi, 2013; Ezz El-Arab i in., 2006). W miodach występują też różnorodne pierwiastki, należące do grup makro- i mikroelementów. Do makroelementów należą pierwiastki, takie jak: Na, K, Ca, Mg, P, S i Cl, oraz mikroelementy, czyli pierwiastki śladowe, w tym toksyczne pierwiastki śladowe między innymi kadm i miedź (Bereksi-Reguig i in., 2022). Zawartość poszczególnych pierwiastków w miodach jest zależna od odmiany miodu, ale też od stanu środowiska, w których te miody powstawały.

Celem przedstawionej pracy było oznaczenie kadmu i miedzi w wybranych miodach dostępnych na rynku polskim i powiązanie wyników z wpływem tych pierwiastków na dietę człowieka.

Wpływ miedzi na zdrowie człowieka

Miedź jest kluczowym pierwiastkiem śladowym w organizmie człowieka. Pozyskiwana z pożywienia, wchłaniana jest głównie w żołądku i jelicie cienkim, a następnie wydalana z żółcią. Pierwiastek ten jest niezbędny do syntezy wielu enzymów metabolicznych. Ponadto miedź jest składnikiem i kofaktorem licznych enzymów oraz białek, pełniąc ważną rolę w prawidłowym funkcjonowaniu organizmu. Dodatkowo miedź odgrywa główną rolę w różnych procesach fizjologicznych, między innymi w detoksykacji reaktywnych form tlenu (RFT), krzepnięciu krwi, syntezy neuroprzekaźników oraz w metabolizmie żelaza. Właściwości miedzi znalazły zastosowanie przy gojeniu się ran po operacyjnych oraz niszczeniu komórek nowotworowych (Wang i in., 2021; Yang i in., 2024; Ruiz i in., 2021). Schemat roli miedzi w organizmie człowieka został przedstawiony na rys. 1.

Pomimo pełnienia ważnych funkcji miedź może również zagrażać życiu i zdrowiu. Niskie stężenie miedzi może hamować wzrost i funkcje odpornościowe. Przez długi czas jedynym widocznym i rozpoznawalnym objawem niedoboru miedzi była choroba Menkesa. Niedobór wpływa również na układ sercowo-naczyniowy, skórny i odpornościowy. Zauważono pogorszenie się wchłaniania miedzi po operacji pomostowania aortal-



Rys. 1. Schemat roli miedzi w organizmie człowieka

no-wieńcowego, co skutkuje ciężkim niedoborem miedzi (Altarelli i in., 2019; Charkiewicz, 2024).

Podwyższone stężenie miedzi w organizmie powoduje utrudnioną homeostazę komórkową, wynikającą z zaburzenia równowagi redoks. Łatwo również prowadzi do reakcji redoks typu Fentona, powodując uszkodzenia oksydacyjne komórek, a w konsekwencji ich śmierć. Toksyczność Cu wynikająca z nadmiaru w diecie nie jest ogólnie uważana za powszechny problem zdrowotny, prawdopodobnie ze względu na mechanizmy homeostatyczne kontrolujące wchłanianie i wydalenie Cu (Bost i in., 2016; Charkiewicz, 2024; Bost i in., 2016). Zatrucie tym pierwiastkiem objawia się osłabieniem, anoreksją oraz zaburzeniami żołądkowo-jelitowymi (Charkiewicz, 2024). Genetyczna choroba odpowiedzialna za akumulację miedzi głównie w wątrobie oraz mózgu to Choroba Wilsona. Wynika ona z nieprawidłowego działania enzymów/transporterów miedzi, a nieleczona może prowadzić do śmierci (Sailer i in., 2024).

Wpływ kadmu na zdrowie człowieka

Kadm (Cd) jest pierwiastkiem występującym naturalnie w glebie (w ilości około 0,2 mg/kg), minerałach i w wodzie. Jednak należy on do pierwiastków toksycznych (Charkiewicz i in., 2023) i uważany jest także za czynnik rakotwórczy (Charkiewicz i in., 2023). Badania wykazały, że długotrwałe narażanie na związki kadmu zwiększają ryzyko raka płuc, nerek, prostaty i trzustki. Ponadto kadm został powiązany z występowaniem raka piersi oraz pęcherza moczowego (Nordberg i in., 2018; Peana i in., 2022).

Wchłanianie Cd odbywa się głównie przez drogi oddechowe oraz w mniejszym stopniu przez przewód pokarmowy. W organizmie transportowany jest do krwiobiegu przez

erytrocyty i albuminy, następnie kumuluje się w nerkach, jelitach i wątrobie. Akumulacja pierwiastka wynika z nieulegania przez metal degradacji metabolicznej do mniej toksycznych form oraz z długotrwałego okresu półtrwania wynoszącym od 16 do 30 lat. Wydalanie go jest bardzo powolne i odbywa się przez nerki, mocz, ślinę, a podczas laktacji również z mlekiem matki. Za jedne z pierwszych objawów zatrucia kadmem (Cd) uważa się schorzenia układu oddechowego, takie jak rozedma płuc, astma i zapalenie oskrzeli, a także nadciśnienie tętnicze. (Genchi i in., 2020; Peana i in., 2022; Charkiewicz i in., 2023). Ze względu na rakotwórcze działanie kadmu nie ma „bezpiecznego” poziomu narażenia. Z tego powodu zaleca się, aby ekspozycja na Cd była utrzymywana na jak najniższym poziomie (Nordberg i in., 2018).

Cel badań

Ze względu na możliwość występowania w miodach zarówno pierwiastków śladowych, jak i toksycznych, celem niniejszej pracy było oznaczenie zawartości miedzi (Cu) oraz kadmu (Cd) w 12 próbkach różnych rodzajów miodu oraz ocena ich potencjalnego znaczenia w diecie człowieka.

Badane próbki i metodyka badań

W Tabeli 1. przedstawiono nazwy miodów wykorzystanych w badaniu, okres kwitnienia roślin, z których pozyskano nektar do ich produkcji, oraz charakterystykę ich barwy. Badane próbki miodów przedstawiono również na rysunku 2.



Rys. 2. Zdjęcie miodów wykorzystywanych do badania. Źródło – fot. Anna Miązek

Tabela 1. Opis miodów używanych do eksperymentu. (opracowanie własne)

L.p.	Rodzaj miodu	Okresy pylenia (kwitnienie) roślin	Kolor
1	akacjowy	maj – początek czerwca	bardzo jasny słomkowy
2	faceliowy	czerwiec – lipiec (sierpień)	jasno bursztynowy
3	gryczany	lipiec – sierpień	ciemny brunatny
4	lipowy	czerwiec – lipiec	jasnożółty
5	mniszkowy	kwiecień – maj	intensywnie żółty
6	nawłociowy	sierpień – wrzesień	złocistożółty

7	rzepakowy	kwiecień – maj	bardzo jasny (po krystalizacji: prawie biały)
8	wielokwiatowy	kwiecień – wrzesień	bursztynowy
9	wrzosowy	sierpień – wrzesień	ciemny bursztynowy
10	spadź iglasta	czerwiec – sierpień (września)	ciemny brunatny
11	spadź liściasta	czerwiec – sierpień	bursztynowy
12	spadź mieszana	czerwiec – sierpień (września)	bardzo ciemny brunatny

Eksperyment przeprowadzono w trzech etapach, które szczegółowo opisano poniżej. Schemat postępowania badawczego obejmował:

- I. Mineralizację próbek miodów w zamkniętym układzie mineralizatora wspomaganego mikrofalami.
- II. Oznaczenie zawartości wybranych pierwiastków (Cu i Cd) metodą atomowej spektroskopii absorpcyjnej (ASA).
- III. Analizę, interpretację oraz opracowanie uzyskanych wyników.

Mineralizacja próbek w zamkniętym systemie mineralizacji wspomaganą mikrofalami

Pierwszym krokiem było odważenie próbek miodów z wykorzystaniem wagi analitycznej z dokładnością do 4 miejsca po przecinku dokładnie około po 0,5 g próbek. Do mineralizacji został wykorzystany zoptymalizowany przepis z oprogramowania mineralizatora (Multiwave 3000, Anton Paar), dlatego do każdej próbki dodano 5,5 cm³ stężonego kwasu azotowego (V) oraz 0,5 cm³ stężonego kwasu solnego. Następnie próbki zostały poddane wstępnej mineralizacji trwającej około 30 min. Po upływie tego czasu próbki zostały włożone do naczyń teflonowych i przygotowane w taki sposób, aby mogły zostać poddane mineralizacji. Mineralizacja zachodziła za pomocą mineralizatora wspomaganego promieniowaniem mikrofalowym Multiwave 3000, Anton Paar.

Oznaczenie z wykorzystaniem techniki ASA (atomowa spektroskopia absorpcyjna)

Atomowa spektroskopia absorpcyjna jest techniką pozwalającą na oznaczenie pierwiastków w ciekłych próbkach. Spektroskopia opiera się na absorpcji przez wolne atomy promieniowania o określonej długości fali (nm). Przed pomiarami zostały przygotowane krzywe wzorcowe z odpowiednimi stężeniami badanego pierwiastka (dla Cd przedział wynosił – od 0,02 do 0,1 µg/l, natomiast dla Cu wynosił od 1 do 10 µg/l). Oznaczona została rów-



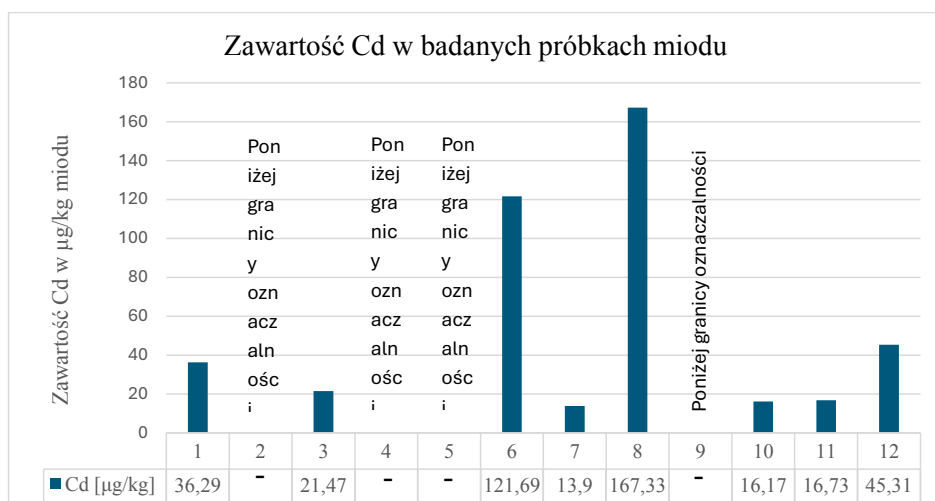
Rys. 3. Pomiary z wykorzystaniem techniki atomowej spektroskopii absorpcyjnej. Źródło własne – fot. Klaudia Kubicka

niez ślepa próba w celu kontroli jakości, w której zawartość wybranych pierwiastków wynosiła poniżej granicy oznaczalności (granice oznaczalności dla Cd – 1,75 µg/kg, a dla Cu – 9,45 µg/kg).

Wyniki i interpretacja

Wyniki badań zostały przedstawione na rysunkach 4. i 5. Rys. 4. przedstawia zawartość Cd, natomiast Rys. 5. przedstawia zawartość Cu w badanych miodach. Zawartość pierwiastków poniżej granicy oznaczalności została oznaczona symbolem „-”. W celu zapewnienia precyzji wyników aparat automatycznie realizował powtórzenia techniczne (replikaty) dla każdej próbki wraz z samoczynną korekcją tła i kalkulacją odchylenia standardowego (SD).”

Przeciętne miesięczne spożycie miodu w polskich gospodarstwach domowych w 2009 roku wynosiło 0,36 kg/os (Majewska i in., 2012).



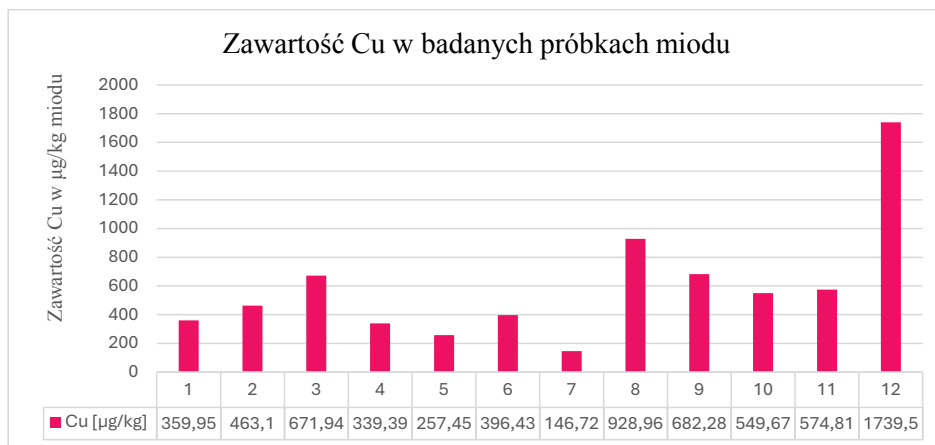
Rys. 4. Wyniki zawartości kadmu w poszczególnych analizowanych próbkach miódów

Kadm został oznaczony w prawie 67% wszystkich zbadanych próbek. W próbkach 2, 4, 5, 9 zawartość pierwiastka była poniżej granicy oznaczalności. Najwięcej Cd znajduje się w próbce 8 – 167,33 µg/kg – miód wielokwiatowy. Najmniejsza zawartość oznaczonego kadmu zastała oznaczona w próbce 10 – miód rzepakowy i wynosi 13,9 µg/kg. Średnia zawartość wykrytego kadmu wynosiła 54,86 µg/kg.

Według zaleceń FAO/WHO dopuszczalne spożycie Cd przez osobę dorosłą wynosi około 0,4-0,5 mg/tydzień, a dawka akceptowalna to 60-70 µg na dobę (Joint FAO/WHO Expert Committee on Food Additives, 2011).

Przeciętne miesięczne spożycie miodu w polskich gospodarstwach domowych w 2009 roku wynosiło 0,36 kg/os. (Majewska i in., 2012). Spożycie dzienne miodu w ciągu miesiąca w polskich gospodarstwach domowych wynosi 0,012 kg/os. Jeśli spożyty zostanie miód z największą zawartością kadmu (167,33 µg/kg), narażenie będzie wynosiło 2,01 µg. Natomiast jeśli użyty zostanie miód z najniższą zawartością lub średnią, to narażenie na toksyczny pierwiastek będzie wynosiło następująco 0,17 i 0,66 µg.

Obecność tego pierwiastka w miodach może wynikać z akumulacji pierwiastków ciężkich w roślinach, wodach oraz żywności pszczoł miodnych. Akumulacja pierwiastków w roślinach wykazała również obecność tego pierwiastka w nektarze i pyłku. Dodatkowo do zanieczyszczenia pszczoł kadmem zaliczone zostało również wdychanie przez nie zanieczyszczonych cząstek unoszących się w powietrzu, które przylegają do ich owłosionej części ciała (Knoll, Cappai, 2024).



Rys. 5. Wyniki zawartości miedzi w poszczególnych analizowanych próbkach miodów

Miedź została oznaczona w 100% zbadanych próbek miodów. Najwyższa jej zawartość została oznaczona w próbce 12 – spadź mieszana i wynosiła 1739,5 µg/kg. Natomiast najmniejsza zawartość Cu została oznaczona w próbce 7 – miód rzepakowy i wynosiła 146,72 µg/kg. Średnia zawartość miedzi we wszystkich próbkach wynosiła 592,52 µg/kg.

Ze względu na ważne funkcje pełnione w organizmie człowieka zalecane jest, aby dzienne spożycie miedzi dla osób dorosłych wynosiło od 0,8 do 2,4 mg/dzień (800-2400 µg/dzień) (Yang i in., 2024).

Jeśli człowiek spożywałby 0,012 kg/dzień miodu o najwyższej zawartości miedzi, to jego dzienne spożycie tego pierwiastka będzie wynosiło 20,87 µg. Natomiast jeśli spożywałby miód rzepakowy (najniższa zawartość Cu) lub miód o średniej zawartości, jego spożycie miedzi wyniosłoby następująco 1,76 i 7,11 µg (Majewska i in., 2012).

Wnioski

Miód jest stosowany przez wielu ludzi do codziennego użytku. Ma on właściwości antybakteryjne, przeciwzapalne i stymuluje reakcje immunologiczne. Od starożytności do dziś jest wykorzystywany przy leczeniu i ochronie przed zakażeniami żołądkowo-jelitowymi, ale również z racji jego walorów smakowych. Miód może zawierać nie tylko pierwiastki śladowe, takie jak miedź, ale również pierwiastki toksyczne takie jak kadm. Miedź jest pierwiastkiem niezbędnym do syntezy kluczowych enzymów metabolicznych. Jest także składnikiem i katalizatorem wielu enzymów i białek. Natomiast kadm jest pierwiastkiem toksycznym i uważany jest za rakotwórczy.

Przeprowadzone badania wykazały obecność kadmu w 67% analizowanych próbek miodu. Najwyższe stężenie tego pierwiastka oznaczono w próbce 8 zawierającej miód wielokwiatowy i wynosiło ono 167,33 $\mu\text{g/kg}$. Obecność kadmu może wynikać z zanieczyszczenia gleby lub środowiska, na którym rosły rośliny wykorzystywane przez pszczoły do produkcji miodu.

Miedź oznaczono we wszystkich badanych próbkach (100%). Najwyższe stężenie tego pierwiastka stwierdzono w próbce 12 zawierającej miód ze spadzi mieszanej i wynosiło ono 1739,5 $\mu\text{g/kg}$.

Przeprowadzone obliczenia wykazały, że zawartość kadmu w żadnej z badanych próbek nie przekraczała wartości uznawanych przez FAO i WHO za dopuszczalne. Jednocześnie zawartość miedzi w żadnej z próbek nie była na tyle wysoka, aby pokryć zalecane dzienne spożycie tego pierwiastka przez człowieka.

Finansowanie

Badania zostały zrealizowane z projektu naukowego pt. „Analiza miodu jako źródła mikroplastiku i pierwiastków w diecie człowieka”. Badania dofinansowano ze środków Ministra Nauki w ramach Programu „Regionalna inicjatywa doskonałości”



Ministerstwo Nauki
i Szkolnictwa Wyższego



Regionalna
Inicjatywa
Doskonałości

(nr projektu: RID/SP/0015/2024/01)”

Bibliografia

- Altarelli M., Ben-Hamouda N., Schneider A., Berger M. M., 2019, Copper Deficiency: Causes, Manifestations, and Treatment, *Nutrition in Clinical Practice*, 34(4), s. 504-513.
- Bereksi-Reguig D., Bouchentouf S., Allali H., Adamczuk A., Kowalska G., Kowalski R., 2022, *Trace Elements and Heavy Metal Contents in West Algerian Natural Honey*, “Biological Trace Element Research”, 200(3), s. 1305-1313.

- Bost M., Houdart S., Oberli M., Kalonji E., Huneau J.-F., Margaritis I., 2016, *Dietary copper and human health: Current evidence and unresolved issues*, "Journal of Trace Elements in Medicine and Biology", 35, s. 107-115.
- Burkhead J. L., Collins J. F., 2022, *Nutrition Information Brief-Copper*, "Current Gastroenterology Reports", 24(6), s. 681-683.
- Charkiewicz A. E., Omeljaniuk W. J., Nowak K., Garley M., Nikliński J., 2023, *Cadmium Toxicity and Health Effects – A Brief Summary*, "International Journal of Molecular Sciences", 24, art. 12802.
- Charkiewicz A. E., 2024, *Copper Still Safe for Us? What Do We Know and What Are the Latest Literature Statements?*, "International Journal of Molecular Sciences", 25, s. 8441-8463.
- Eteraf-Oskouei T., Najafi M., 2013, *Traditional and Modern Uses of Natural Honey in Human Diseases: A Review*, "Iranian Journal of Basic Medical Sciences", 16(6), s. 731-742.
- Ezz El-Arab A. M., Girgis S. M., Hegazy E. M., Abd El-Khalek A. B., 2006, *Effect of dietary honey on intestinal microflora and toxicity of mycotoxins in mice*, "BMC Complementary and Alternative Medicine", 6, art. 6.
- Genchi G., Sinicropi M. S., Lauria G., Carocci A., Catalano A., 2020, *The Effects of Cadmium Toxicity*, "International Journal of Environmental Research and Public Health", 17(11), art. 3782.
- Joint FAO/WHO Expert Committee on Food Additives, 2011, *Safety Evaluation of Certain Food Additives and Contaminants*, WHO Press, Geneva, s. 305-374.
- Knoll S., Cappai M. G., 2024, *Foraging Activity of Honey Bees and Exposure to Cadmium: a Review*, "Environmental Science and Pollution Research", 31, s. 5733-5742.
- Majewska E., Kowalska J., Łapińska M., 2012, *Analiza czynników dotyczących miodów naturalnych kształtujących preferencje konsumenckie studentów*, „Zeszyty Naukowe SGGW”, Warszawa, s. 78.
- Nordberg G. F., Bernard A., Diamond G. L., Duffus J. H., Illing P., Nordberg M., Bergdahl I. A., Jin T., Skerfving S., 2018, *Risk assessment of effects of cadmium on human health (IUPAC Technical Report)*, "Pure and Applied Chemistry", 90(4), s. 755-808.
- Peana M., Pelucelli A., Chasapis C. T., Perlepes S. P., Bekiari V., Medici S., Zoroddu M. A., 2022, *Biological Effects of Human Exposure to Environmental Cadmium*, *Biomolecules*, 12(6), art. 788.
- Poulsen-Silva E., Gordillo-Fuenzalida F., Velásquez P., Llancahuén F. M., Carvajal R., Cabaña-Brunod M., Otero M. C., 2023, *Antimicrobial, Antioxidant, and Anti-Inflammatory Properties of Monofloral Honey from Chile*, *Foods*, 12(9), art. 1785.
- Ruiz L. M., Libedinsky A., Elorza A. A., 2021, *Role of Copper on Mitochondrial Function and Metabolism*, *Frontiers in Molecular Biosciences*, 8, art. 711227.
- Sailer J., Nagel J., Akdogan B., Jauch A. T., Engler J., Knolle P. A., Zischka H., 2024, *Deadly excess copper*, "Redox Biology", 70, art. 103256.
- Vijān L. E., Mazilu I. C., Enache C., Enache S., Topală C. M., 2023, *Botanical Origin Influence on Some Honey Physicochemical Characteristics and Antioxidant Properties*, *Molecules*, 28(5), art. 2134.
- Wang P., Yuan Y., Xu K., Zhong H., Yang Y., Jin S., Yang K., Qi X., 2021, *Biological applications of copper-containing materials*, "Bioactive Materials", 6(4), s. 916-927.

Yang Y., Wu J., Wang L., Ji G., Dang Y., 2024, *Copper homeostasis and cuproptosis in health and disease*, “Signal Transduction and Targeted Therapy”, 9, art. 23.



Zeszyty Studenckiego Ruchu Naukowego
Uniwersytetu Jana Kochanowskiego w Kielcach, 2026, tom 35, część 2

Fascicles of Student Scientific Movement
the Jan Kochanowski University in Kielce, 2026, volume 35, part 2

JULIA RURIK, MICHALINA RACZKOWSKA

Studentki II roku mikrobiologii, studia II stopnia
Koło Naukowe Mikrobiologów Molekularnych „Coccus”
Uniwersytet Warmińsko-Mazurski w Olsztynie
Second-year students of Microbiology, second-cycle programme
“COCCUS” Student Scientific Circle of Molecular Microbiologists
University of Warmia and Mazury in Olsztyn

Filtracja czy inkubacja? Ocena jakości mikrobiologicznej wody wodociągowej po zastosowaniu urządzeń filtrujących

Filtration or Incubation? Assessment of the Microbiological Quality of Tap Water
Following the Use of Filtration Devices

Summary: The aim of the study was to assess the microbiological quality of tap water in Olsztyn following filtration using new and previously used filtration devices. The numbers of mesophilic and psychophilic bacteria and the presence of indicator bacteria (*Escherichia coli* and faecal enterococci) were determined using membrane filtration and plating on culture media. Microbial counts varied depending on the type of filtration device used. The highest values were recorded in samples obtained from a previously used filter bottle, while the lowest were found in unfiltered tap water. Indicator bacteria were detected in some filtered water samples, whereas the tap water complied with the applicable standards. The findings indicate that the long-term use of filtration devices may promote microbial growth, probably as a result of biofilm formation.

Keywords: water treatment systems, microbiological indicators, membrane filtration, microbial growth in filters

Wprowadzenie

Woda jest niezbędna do prawidłowego funkcjonowania organizmu człowieka. Odpowiednie nawodnienie organizmu odgrywa istotną rolę m.in. w transporcie składników odżywczych i tlenu do komórek, regulacji temperatury ciała oraz procesach trawienia (Dymarska i Janczar-Smuga, 2016, 56; Su i in. 2022, 1). Jednocześnie woda może być nośnikiem patogenów, takich jak *Escherichia coli* czy *Enterococcus sp.*, przez co staje się niebezpieczna dla zdrowia człowieka. Zakażenie drobnoustrojami chorobotwórczymi może objawiać się wymiotami, biegunką, wysoką gorączką, a w skrajnych przypadkach prowadzić do śmierci (Batra i in. 2023, 2; Kozarić i in. 2023, 151-152). Ryzyko infekcji może

występować nawet przy dostępie do wody wodociągowej spełniającej krajowe lub lokalne normy bezpieczeństwa (Su i in. 2022, 1). Dodatkowo woda może zawierać różnego rodzaju zanieczyszczenia fizyczne i chemiczne, takie jak zawiesiny, związki metali ciężkich czy chlor. W odpowiedzi na obawy związane z jakością wody kranowej, w gospodarstwach domowych zaczęto stosować dzbanki i butelki filtrujące jako łatwe w użyciu rozwiązania poprawiające jakość wody wodociągowej. Standardowe filtry wykorzystują węgiel aktywny redukujący chlor, żywicę jonowymienną wychwytyjącą metale ciężkie oraz siatkę zatrzymującą drobne cząstki (Kozarić i in. 2023, 152). Jednak standardowe urządzenia filtrujące nie są zaprojektowane do skutecznej eliminacji mikroorganizmów ze względu na charakterystykę materiału filtrującego. Jego porowata struktura umożliwia absorpcję związków chemicznych, lecz nie stanowi wystarczającej bariery dla bakterii, grzybów i wirusów. Ponadto niektóre badania wskazują, że filtry mogą sprzyjać rozwojowi biofilmów, w których osiedlają się różnorodne mikroorganizmy (Clark i in. 2023, 1-8).

Powyższe doniesienia wskazują na potrzebę oceny jakości mikrobiologicznej wody po zastosowaniu domowych urządzeń filtrujących.

Celem niniejszej pracy była ocena jakości mikrobiologicznej wody wodociągowej w Olsztynie po filtracji z wykorzystaniem nowych i używanych urządzeń uzdatniających (butelek i dzbanków filtrujących). W badanych próbkach oznaczano liczbę bakterii wskaźnikowych, tj. *Escherichia coli* i enterokoków kałowych oraz ogólną liczbę bakterii mezofilnych i psychrofilnych.

Materiał i metody badań

Do porównania skuteczności usuwania zanieczyszczeń mikrobiologicznych z wody wodociągowej wykorzystano nową i używaną butelkę filtrującą Dafi oraz używane dzbanki marki Dafi oraz Brita. Próbę kontrolną stanowiła woda z sieci wodociągowej w Olsztynie (Tabela 1).

Przed rozpoczęciem eksperymentu w dzbankach założono nowe wkłady filtrujące. Wszystkie filtry testowano przy użyciu tej samej wody wodociągowej, którą filtrowano zgodnie z zaleceniami producenta. W próbkach oznaczano ogólną liczbę bakterii mezofilnych i psychrofilnych oraz obecność bakterii wskaźnikowych – paciorkowców kałowych oraz *Escherichia coli*. Pobieranie materiału przeprowadzano przez 36 dni. Próbkę wody pobierano sześciokrotnie: bezpośrednio po zamontowaniu nowego filtra oraz w 14., 18., 28., 32. i 35. dniu użytkowania filtra w przypadku bakterii wskaźnikowych. Natomiast dla bakterii mezofilnych i psychrofilnych pobór prób odbywał się nieregularnie, a dni pomiarowe różniły się między grupami. Do analizy mikrobiologicznej wykorzystano metodę filtracji membranowej oraz metodę zalewaną. Po przefiltrowaniu 100 ml wody filtry przenoszono na odpowiednie podłoża hodowlane: membrane-Fecal Coliform (mFC) do hodowli *E. coli* oraz Slanetz-Bartley (SB) do oznaczenia paciorkowców kałowych. Gotowe płytki inkubowano w kolejno w temperaturze 44,5°C przez 24 godziny i 37°C przez 72 godziny. W celu określenia liczby bakterii psychro- i mezofilnych w próbkach sporządzono odpowiednie rozcieńczenia próbek (1 ml, 0,1 ml, 0,01 ml). Bakterie mezofilne i psychrofilne hodowano na podłożu tryptonowo-sojowym (TSA), które inkubowano

Tabela 1. Zastosowane urządzenia uzdatniające wodę (opracowanie własne)

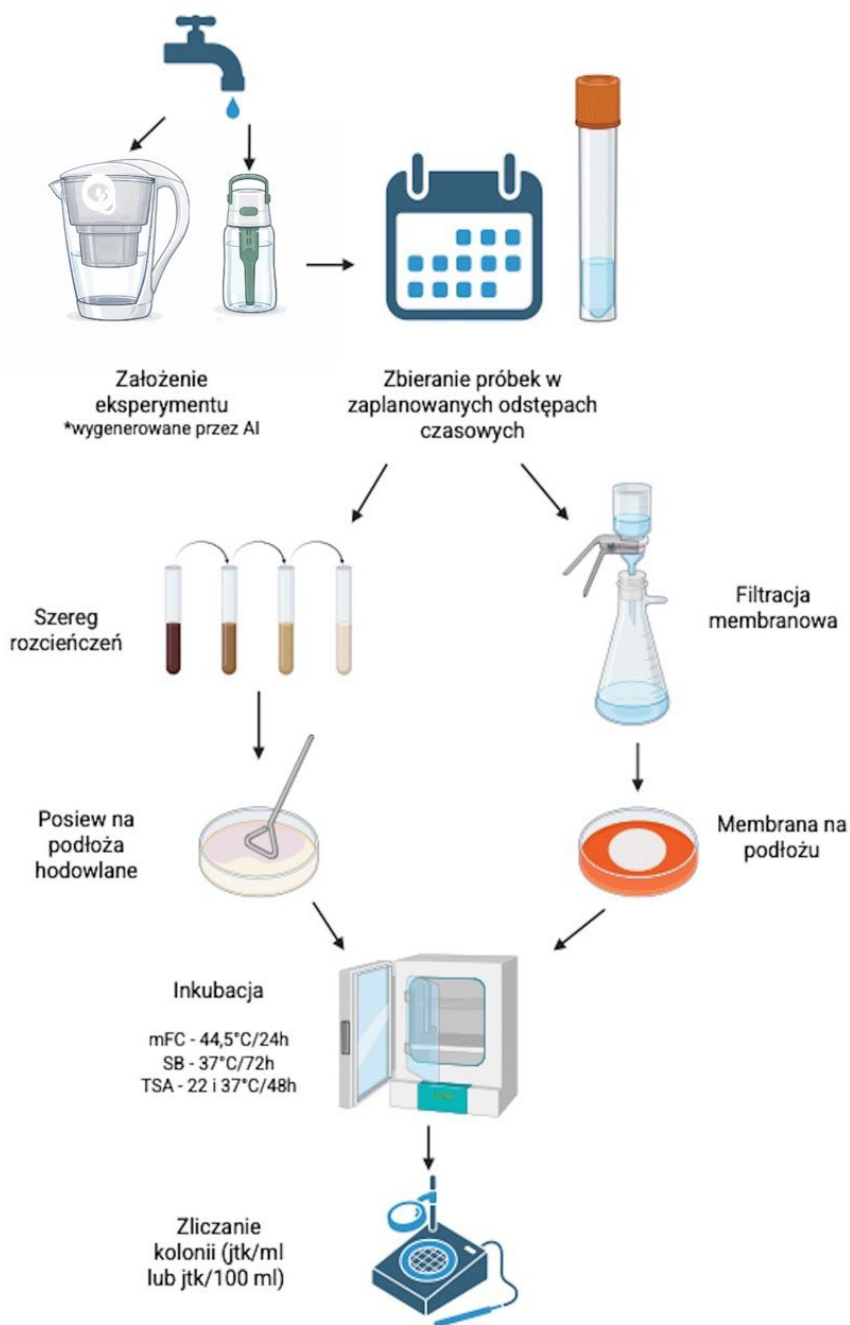
Numer próby	Urządzenie filtrujące
1.	Używana butelka DAFI
2.	Nowa butelka DAFI
3.	Dzbanek DAFI
4.	Dzbanek BRITA
5.	Woda wodociągowa

w temperaturach 37°C przez 24 godziny (bakterie mezofilne) i 22°C przez 48 godziny (bakterie psychrofilne). Badany materiał wysiewano w dwóch powtórzeniach. Po inkubacji zliczono liczbę wyrosniętych kolonii na płytkach i przeliczono wyniki na jednostki tworzące kolonie na mililitr (jtk/ml lub jtk/100 ml) (rysunek 1).

Wyniki badań

W badanym materiale stwierdzono zróżnicowaną liczbę mikroorganizmów w zależności od rodzaju zastosowanego urządzenia filtrującego. Najwyższą liczbę drobnoustrojów mezofilnych odnotowano w próbkach wody pochodzącej z używanej butelki Dafi, gdzie ich ilość była zdecydowanie większa niż w pozostałych próbkach. W wodzie filtrowanej za pomocą nowej butelki Dafi liczba mezofili była nieco niższa, jednakże najniższe stężenie bakterii po uzdatnianiu wody wodociągowej zaobserwowano w próbkach pochodzących z dzbanków Dafi i Brita. Woda wodociągowa, w porównaniu z wodą przefiltrowaną, charakteryzowała się najmniejszą liczbą drobnoustrojów mezofilnych spośród wszystkich badanych próbek (tabela 2, wykres 1).

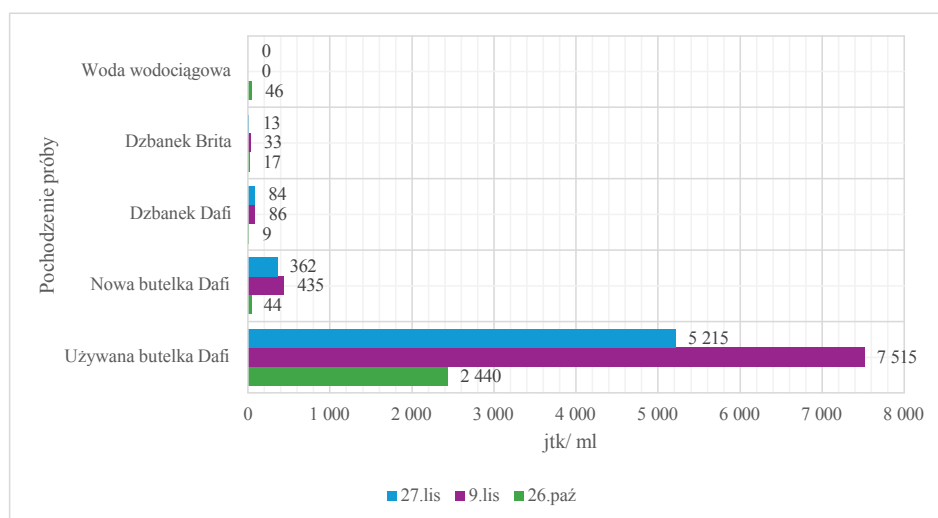
W analizowanych próbkach wody liczba bakterii psychrofilnych wykazywała wyraźne zróżnicowanie w zależności od typu zastosowanego urządzenia filtrującego oraz wahania w kolejnych terminach pomiarowych. Ponownie najwyższą liczbę drobnoustrojów odnotowano w wodzie po uzdatnianiu z wykorzystaniem butelki Dafi, natomiast najniższą w wodzie wodociągowej niepoddanej filtracji (próbce kontrolnej). Liczba bakterii psychrofilnych w próbkach wody po filtracji z użyciem nowej butelki Dafi oraz dzbanków Brita i Dafi utrzymywały się na pośrednim poziomie, przy czym w poszczególnych dniach obserwowano okresowe wzrosty i spadki liczby jednostek tworzących kolonie na 1 ml (tabela 3, wykres 2).



Rys. 1. Schemat przebiegu doświadczenia (opracowano w programie Biorender)

Tabela 2. Liczba bakterii mezofilnych w wodzie wodociągowej w Olsztynie (opracowanie własne)

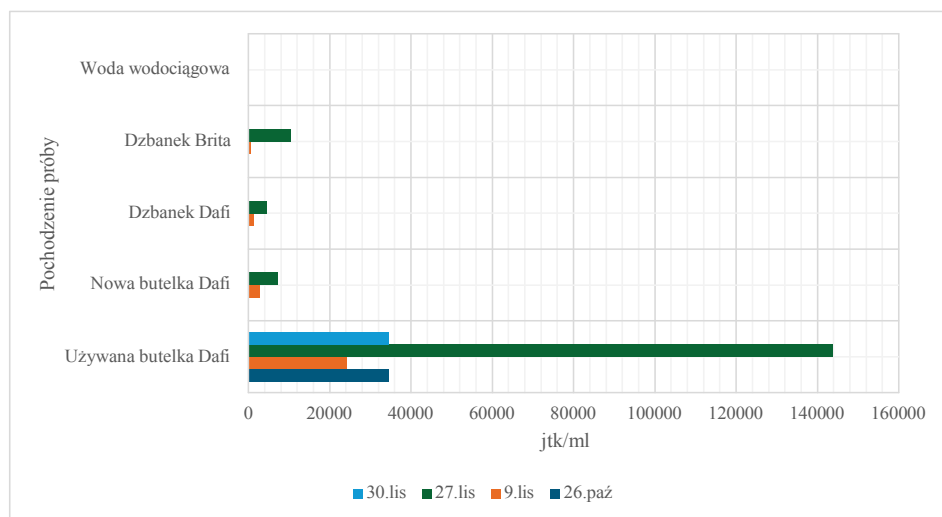
Data odczytu	Temperatura	Numer próby	Rozcieńczenie	Płytką 1	Płytką 2	jtk/1ml
26.10	37°C	1	1	90	398	2 440
		2	0	45	43	44
		3	0	7	10	9
		4	0	15	18	17
		5	0	41	50	46
09.11	37°C	1	1	763	740	7 515
		2	0	449	421	435
		3	0	93	78	86
		4	0	33	33	33
		5	0	0	0	0
23.11	37°C	1	1	510	533	5 215
		2	0	381	343	362
		3	0	128	40	84
		4	0	2	23	13
		5	0	0	0	0



Wykres 1. Liczba bakterii mezofilnych w próbkach wody wodociągowej oraz wody filtrowanej za pomocą różnych urządzeń uzdatniających (opracowanie własne)

Tabela 3. Liczba bakterii psychrofilnych w wodzie wodociągowej w Olsztynie (opracowanie własne)

Data odczytu	Temperatura	Numer próby	Rozcieńczenie	Płytką 1	Płytką 2	jtk/1ml
26.10	22°C	1	2	166	525	34 550
		2	0	8	1	5
		3	0	0	2	1
		4	0	58	26	42
		5	0	6	2	4
09.11	22°C	1	2	223	264	24 350
		2	1	268	278	2 730
		3	1	140	121	1 305
		4	1	56	59	575
		5	0	0	0	0
27.11	22°C	1	2	1 600	1 276	143 800
		2	1	712	720	7 160
		3	1	476	450	4 630
		4	1	980	1 112	10 460
		5	0	29	17	23
30.11	22°C	1	2	166	525	34 550
		2	0	8	1	5
		3	0	0	2	1
		4	0	58	26	42
		5	0	6	2	4



Wykres 2. Liczba bakterii psychrofilnych w próbkach wody wodociągowej oraz wody filtrowanej za pomocą różnych urządzeń uzdatniających (opracowanie własne)

Badania mikrobiologiczne próbek wody pochodzących z urządzeń filtrujących wykazały obecność bakterii wskaźnikowych. W pierwszym poborze materiału z używanej butelki Dafi odnotowano bardzo wysoką liczbę kolonii *E. coli*, określoną jako niepoliczalną, oraz enterokoki kałowe w liczbie 23 jtk/100 ml. W drugim poborze w wodzie nie stwierdzono już obecności *E. coli*, natomiast liczba enterokoków zmniejszyła się do 7 jtk/100 ml. W kolejnych analizach próbek wody z tego urządzenia nie wykryto obecności badanych bakterii. W materiale pobranym z nowej butelki Dafi nie wykryto kolonii *E. coli*, natomiast podczas czwartego poboru enterokoki osiągnęły poziom 1 jtk/100 ml. W wodzie po filtracji z wykorzystaniem dzbanka Dafi stwierdzono obecność enterokoków kałowych w pierwszym, drugim oraz czwartym poborze w liczbie 1 jtk/100 ml. W żadnej z prób nie wykryto *E. coli*. W przypadku dzbanka Brita w pierwszym poborze odnotowano 6 jtk/100 ml *E. coli*, natomiast w kolejnych próbkach bakterii tych nie stwierdzono. Enterokoki kałowe wykryto w liczbie 3 jtk/100 ml w pierwszym poborze, a w drugim ich liczba wzrosła do 38 jtk/100 ml. W pozostałych próbkach nie stwierdzono ich obecności. Woda wodociągowa stanowiąca próbkę kontrolną była pozbawiona bakterii wskaźnikowych na każdym etapie badania (tabela 4).

Tabela 4. Liczba enterokoków kałowych oraz *Escherichia coli* w wodzie wodociągowej w Olsztynie przed filtracją i po filtracji (opracowanie własne)

Data odczytu	Numer próby	<i>Escherichia coli</i> (jtk/100 ml)	Enterokoki kałowe (jtk/100 ml)
26.10	1	Niepoliczalne	23
	2	0	0
	3	0	1
	4	6	3
	5	0	0
09.11	1	0	7
	2	0	0
	3	0	1
	4	0	38
	5	0	0
13.11	1	0	0
	2	0	0
	3	0	0
	4	0	0
	5	0	0
23.11	1	0	0
	2	0	1
	3	0	1
	4	0	0
	5	0	0

27.11	1	0	0
	2	0	0
	3	0	0
	4	0	0
	5	0	0
30.11	1	0	0
	2	0	0
	3	0	0
	4	0	0
	5	0	0

Wnioski

1. Woda wodociągowa charakteryzowała się najmniejszą liczbą drobnoustrojów mezofilnych i psychrofilnych, co odpowiada oczekiwanej jakości mikrobiologicznej wody przeznaczonej do spożycia.
2. Na podstawie Rozporządzenia Ministra Zdrowia z dnia 11 grudnia 2017 r. w sprawie jakości wody przeznaczonej do spożycia przez ludzi [Dz. U. z 2017 r. poz. 328, 1566 i 2180] wszystkie próbki wody wodociągowej stanowiące próbkę kontrolną spełniały normy mikrobiologiczne w zakresie bakterii wskaźnikowych, dlatego wodę tę można uznać za bezpieczną do spożycia przez ludzi.
3. W przypadku urządzeń filtrujących używanych przez dłuższy czas obserwowano okresowy wzrost liczby bakterii wskaźnikowych. Zgodnie z obowiązującym rozporządzeniem stwierdzono, że część próbek wody po filtracji nie spełniała wymagań mikrobiologicznych, co wskazuje na konieczność regularnej wymiany filtrów oraz dbania o higienę urządzeń.
4. W próbkach, w których analizowano bakterie psychrofilne, obserwowano okresowe wahania liczby kolonii w kolejnych dniach pomiarowych, natomiast bakterie mezofilne wykazywały bardziej stabilną liczebność. Taki charakter zmian sugeruje, że rozwój mikroorganizmów w wodzie po filtracji jest dynamiczny i zależy zarówno od rodzaju bakterii, jak i warunków przechowywania wody w urządzeniu.
5. Wysoka liczba drobnoustrojów, szczególnie w próbkach pochodzących z używanej butelki filtrującej, może wskazywać na tworzenie się biofilmu na powierzchniach wewnętrznych urządzenia. Biofilm stanowi środowisko sprzyjające namnażaniu się mikroorganizmów oraz ich okresowemu uwalnianiu do wody, co może wyjaśniać obserwowane wahania liczby bakterii w kolejnych terminach pomiarowych.

Bibliografia

Batra A., Cottam D., Lepesteur M., Dexter C., Zuccala K., Martino C., Khudur L., Daniel V., Ball A., Soni S., 2023, *Development of A Rapid, Low-Cost Portable Detec-*

- tion Assay for Enterococci in Wastewater and Environmental Water*, „Microorganisms”, z. 11, s. 1-16.
- Clark G., Geisler D., Coey E., Pollitz L., Zaki F., Huang C., Boppart S., Nguyen T., 2023, *Influence of phosphate on bacterial release from activated carbon point-of-use filters and on biofilm characteristics*, „Science of the Total Environment”, z. 914, s. 1-10.
- Dymarska E., Janczar-Smuga M., 2016, *Woda jako niezbędny składnik pokarmowy w żywieniu osób w podeszłym wieku*, „Prace Naukowe Uniwersytetu Ekonomicznego we Wrocławiu”, z. 461, s. 55-64.
- Kozarić S., Hrapović A., Trebo A., Tipura A., Hromić-Jahjefendić A., Adilović M., 2023, *Comparison of Brita and Profissimo water filters*, „Heritage and Sustainable Development”, z. 5, s. 151-158.
- Rozporządzenie Ministra Zdrowia z dnia 11 grudnia 2017 r. w sprawie jakości wody przeznaczonej do spożycia przez ludzi*, Dz. U. z 2017 r. poz. 328, 1566 i 2180.
- Su Z., Liu T., Men Y., Li S., Graham N., Yu W., 2022, *Understanding point-of-use tap water quality: From instrument measurement to intelligent analysis using simple filtration*, „Water Research”, z. 225, s. 119-205.



Zeszyty Studenckiego Ruchu Naukowego
Uniwersytetu Jana Kochanowskiego w Kielcach, 2026, tom 35, część 2

Fascicles of Student Scientific Movement
the Jan Kochanowski University in Kielce, 2026, volume 35, part 2

MARCIN WALAS

Student I roku inżynierii środowiska, studia II stopnia
Koło Naukowe Studentów HVAC Politechniki Rzeszowskiej
Politechnika Rzeszowska im. Ignacego Łukasiewicza
First-year student of Environmental Engineering, second-cycle programme
HVAC Students' Scientific Circle
Ignacy Łukasiewicz Rzeszów University of Technology

Analiza liniowych mostków cieplnych – połączenie okna z przegrodą zewnętrzną

Analysis of Linear Thermal Bridges: The Junction between a Window and an External Wall

Summary: Reducing energy consumption in the building sector is currently a priority because of the need to reduce greenhouse gas emissions and rising operating costs. In the context of increasingly stringent technical regulations, eliminating linear thermal bridges that arise at window-to-wall junctions has become a critical issue. The aim of the study was to determine the effect of these phenomena on the monthly and annual energy balance of a single-family residential building. The research methodology was based on thermographic diagnostics and calculations of thermal transmittance that took account of linear thermal bridge parameters. The analysis demonstrates that, despite significant heat losses during winter, the annual heat balance of the analysed elements remains negative, confirming their function as passive energy collectors.

Keywords: thermographic diagnostics, thermal analysis of buildings, window energy balance, thermal insulation performance of transparent building components

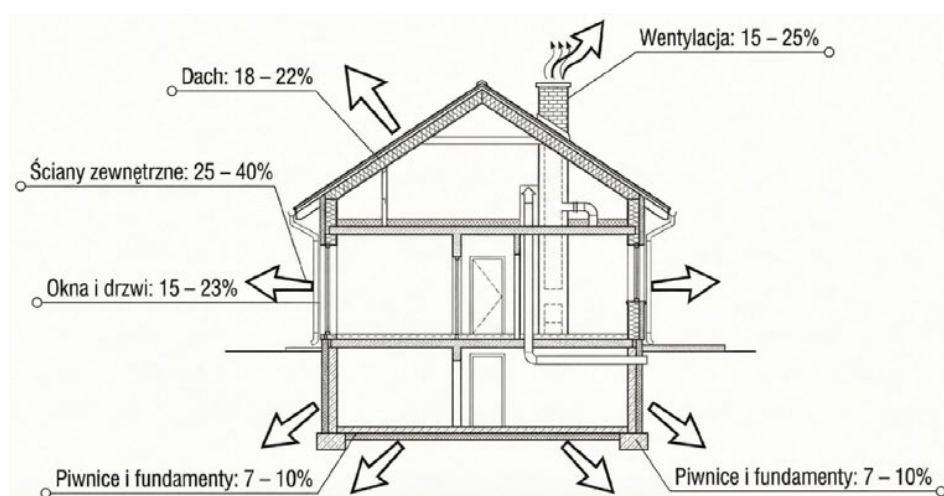
Wstęp

Izolacja termiczna należy do kluczowych elementów kształtujących efektywność energetyczną budynku. Jej podstawową funkcją jest ograniczenie strat ciepła przenikającego przez przegrody, takie jak ściany, dachy czy stropy. Właściwy dobór materiałów oraz odpowiedniej grubości warstwy izolacyjnej umożliwia istotne zmniejszenie przepływu energii cieplnej, co przekłada się na redukcję zapotrzebowania na ogrzewanie (Kasperkiewicz 2018). W efekcie budynek osiąga lepsze parametry energetyczne, a współ-

czynnik przenikania ciepła utrzymuje się na poziomie zgodnym z obowiązującymi przepisami i normami (Kaczkowska, 2013, 16-26).

W skali całego kraju projektowanie oraz realizacja budynków energooszczędnych ma szczególne znaczenie, ponieważ szacuje się, że ogrzewanie pomieszczeń odpowiada za około 40% całkowitego zużycia energii. Ograniczenie strat ciepła wpływa więc nie tylko na obniżenie kosztów eksploatacji pojedynczych obiektów, ale także na zmniejszenie zużycia energii w ujęciu ogólnokrajowym. Z tego względu kontrola izolacyjności cieplnej oraz spełnianie wymagań dotyczących maksymalnych wartości współczynnika przenikania ciepła są istotne zarówno dla inwestorów, jak i dla polityki energetycznej państwa (Smusz, Bałon, Kielbasa, Rejman, Bembenek, Kowalski, 2022, 316).

Wśród detali konstrukcyjnych szczególnie narażonych na straty ciepła istotną rolę odgrywają okna. Stanowią one element przegrody o znacznie niższej izolacyjności niż ściany, a dodatkowo ich połączenie z przegrodą zewnętrzną często staje się miejscem występowania liniowych mostków cieplnych. Niewłaściwie zaprojektowany lub wykonany montaż może prowadzić do zwiększonego przenikania ciepła zarówno przez przeszklenie, jak i w obrębie ościeża. W konsekwencji pojawiają się dodatkowe straty energii, a także ryzyko obniżenia komfortu cieplnego oraz lokalnego wychłodzenia powierzchni wewnętrznych (Ministerstwo Infrastruktury i Budownictwa, 2016, 28-30).



Rys. 1. Struktura strat ciepła przez przegrody budowlane (opracowanie własne)

Jednym z narzędzi wykorzystywanych do analizy strat ciepła jest termografia. Technika ta obejmuje metody badawcze umożliwiające zdalną i bezkontaktową ocenę rozkładu temperatur na powierzchni badanego obiektu. Jej działanie opiera się na detekcji oraz rejestracji promieniowania podczerwonego emitowanego przez ciało, a następnie przekształceniu go w obraz widzialny, który odzwierciedla pole temperatury danej powierzchni (www.testo.com.pl). Uzyskane w ten sposób termogramy umożliwiają identyfikację mostków cieplnych oraz wskazanie obszarów narażonych na zawilgocenie i roz-

wój pleśni. Zjawiska te mogą wynikać zarówno z błędów wykonawczych, jak i z niewystarczającej izolacyjności przegród budowlanych (PN-EN 13187). Podczas wykonywania badań termowizyjnych należy uwzględnić warunki środowiskowe, takie jak wilgotność powietrza, jego ruch czy stopień zanieczyszczenia, które mogą wpływać na dokładność pomiarów.

Istotnym elementem oceny komfortu cieplnego jest kontrola termograficzna. Polega ona na wykrywaniu oraz ocenie stopnia występowania nieciągłości i defektów w obudowie termicznej budynku. Umożliwia także identyfikację nieprawidłowości w rozkładzie temperatur na powierzchniach przegród. W celu właściwej interpretacji wyników konieczne jest porównanie uzyskanych termogramów z rozkładem temperatur przewidywanym na podstawie charakterystyki projektowej budynku. Dzięki temu możliwe jest precyzyjne określenie miejsc o pogorszonych właściwościach izolacyjnych (PN-EN 13187).

Problem strat ciepła przez okna

Okna stanowią istotny element obudowy budynku, a straty ciepła przez nie są zazwyczaj znacznie większe niż w przypadku dobrze zaizolowanych przegród nieprzezroczystych, takich jak ściany zewnętrzne. Wynika to nie tylko z mniej korzystnych właściwości termofizycznych samych okien, lecz także z faktu, że w miejscu ich montażu dochodzi do przerwania ciągłości izolacji cieplnej przegrody (Rutkowska, Klepak, Podawca, 2013). W obszarze styku ramy okiennej z murem powstaje mostek cieplny, który sprzyja intensywniejszemu przepływowi ciepła i prowadzi do pogorszenia parametrów energetycznych całej przegrody. Zjawisko to może skutkować zwiększonymi stratami energii, a także lokalnym obniżeniem temperatury powierzchni wewnętrznych, co w konsekwencji sprzyja kondensacji pary wodnej oraz rozwojowi pleśni w strefie ościeży (Gao, Roux, Zhao, 2007, 281).



Rys. 2. Termogram połączenia okien ze ścianą zewnętrzną (opracowanie własne)

W ostatnich latach zauważalne jest zaostrzenie przepisów dotyczących izolacyjności cieplnej przegród budowlanych, w tym ograniczania wpływu mostków cieplnych. W wielu krajach europejskich wprowadzono szczegółowe wymagania odnoszące się do dopuszczalnych wartości liniowego współczynnika przenikania ciepła. W przypadku budynków o niemal zerowym zużyciu energii przyjmowane są szczególnie rygorystyczne wartości graniczne.

Termogram (rys. 2) przedstawia fragment elewacji budynku zarejestrowany w warunkach zimowych, przy wyraźnej różnicy temperatur pomiędzy wnętrzem obiektu a środowiskiem zewnętrznym. Obraz wykonano przy użyciu kamery termowizyjnej Testo 885. W trakcie pomiaru temperatura powietrza na zewnątrz wynosiła -20°C , natomiast wewnątrz ogrzewanych pomieszczeń utrzymywała się na poziomie około $+20^{\circ}\text{C}$. Panujące warunki atmosferyczne, takie jak mgła oraz zachmurzenie, sprzyjały przeprowadzeniu wiarygodnej diagnostyki termowizyjnej, ograniczając wpływ promieniowania odbitego.

Dążenie do ograniczenia zużycia energii w budynkach stanowi jeden z istotnych elementów działań na rzecz zrównoważonego rozwoju oraz redukcji emisji gazów cieplarnianych. Rosnące koszty eksploatacji obiektów sprawiają, że poprawa efektywności energetycznej przegród budowlanych ma również duże znaczenie ekonomiczne. W tym kontekście szczególnie ważne jest ograniczanie strat ciepła związanych z występowaniem liniowych mostków termicznych, zwłaszcza w obszarze połączenia okna ze ścianą zewnętrzną. Zmniejszenie wartości liniowego współczynnika przenikania ciepła ψ pozwala ograniczyć zapotrzebowanie budynku na energię do ogrzewania, poprawić komfort cieplny oraz zmniejszyć ryzyko kondensacji pary wodnej i rozwoju pleśni. Efekt ten można osiągnąć m.in. poprzez odpowiednie usytuowanie okna w warstwie izolacji termicznej oraz zastosowanie materiałów o niskiej przewodności cieplnej.

Metodyka obliczeń

Metodyka obliczeń obejmuje analizę strat i zysków ciepła przez okno na podstawie parametrów jego izolacyjności cieplnej oraz warunków eksploatacyjnych. Kluczowym etapem jest wyznaczenie współczynnika przenikania ciepła U_w uwzględniającego udział szyby, ramy oraz liniowych mostków cieplnych (PN-EN ISO 10077, PN-EN ISO 10211-2).

W obliczeniach wykorzystano model obliczeniowy pozwalający przeprowadzenie analizy zgodnej z zasadami fizyki budowli oraz obowiązującymi wytycznymi normowymi (Starakiewicz, Szyszka, 2009, Asdrubali, Baldinelli, Bianchi, 2011).

Współczynnik przenikania ciepła okna:

$$U_w = \frac{\sum_j (A_{g,j} \cdot U_{g,j}) + \sum_i (A_{f,i} \cdot U_{f,i}) + \sum_i (l_{g,i} \cdot \psi_{g,i})}{\sum_j A_{g,j} + \sum_i A_{f,i}} \left[\frac{W}{m^2 \cdot K} \right] \quad (1),$$

gdzie:

U_w – współczynnik przenikania ciepła okna, $\frac{W}{m^2 \cdot K}$,

- U_g – współczynnik przenikania ciepła szyby, $\frac{W}{m^2 \cdot K}$,
 U_r – współczynnik przenikania ciepła elementów współpracujących ramy okiennej, $\frac{W}{m^2 \cdot K}$,
 Ψ_g – liniowy współczynnik przenikania ciepła wynikający z połączonych efektów cieplnych szyby, ramki dystansowej i ramy okiennej, $\frac{W}{m^2 \cdot K}$,
 A_g – pole powierzchni szyby w oknie, m^2 ,
 A_r – pole powierzchni ramy okiennej przy danym elemencie współpracującym, m^2 ,
 l_g – widoczny obwód szyby w oknie przy danym elemencie współpracującym, m.

Na tej podstawie określono miesięczne straty ciepła wynikające z przenikania oraz zyski energii od promieniowania słonecznego. Bilans cieplny okna wyznaczono jako różnicę tych wielkości, co umożliwia ocenę jego wpływu na charakterystykę energetyczną budynku.

Bilans ciepła okna:

$$Q_h(m) = Q_{zo}(m) - Q_s(m) [kWh], \quad (2)$$

gdzie: $Q_h(m)$ – bilans ciepła okna, kWh,

$Q_{zo}(m)$ – straty ciepła przez okno w miesiącu m-tym, kWh,

$Q_s(m)$ – zyski ciepła od słońca przez okno w miesiącu m-tym, kWh.

Straty ciepła przez okno:

$$Q_{zo}(m) = \sum_m 0,024 \cdot A_w \cdot U_w \cdot [T_i - T_e(m)] \cdot Ld(m) [kWh], \quad (3)$$

gdzie:

A_w – pole powierzchni okna, m^2 ,

T_i – temperatura powietrza w pomieszczeniu, $^{\circ}C$,

$T_e(m)$ – temperatura powietrza zewnętrznego w m-tym miesiącu, $^{\circ}C$,

$Ld(m)$ – liczba dnia grzewczych w m-tym miesiącu, d.

Zyski ciepła od słońca przez okno:

$$Q_s(m) = \sum_m 0,001 \cdot C_g \cdot A_w \cdot g \cdot I_i(m) \cdot Z \cdot \frac{Ld(m)}{Lk(m)} [kWh], \quad (4)$$

gdzie:

C_g – współczynnik zaszklania okna,

g – współczynnik przepuszczania całkowitego promieniowania słonecznego szyby,

$I_i(m)$ – suma miesięczna całkowitego promieniowania słonecznego dla i -tej orientacji na jednostkę powierzchni w m -tym miesiącu $\frac{Wh}{m^2}$,

Z – współczynnik zacienienia elewacji,

$Lk(m)$ – liczba dni kalendarzowych w m -tym miesiącu, d.

Wyniki

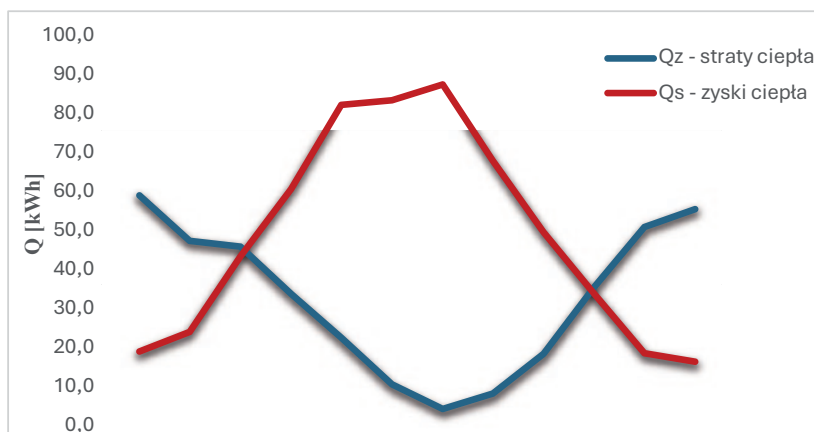
Analizowane mostki cieplne zlokalizowane są w budynku jednorodzinnym o trzech kondygnacjach mieszkalnych i łącznej powierzchni użytkowej wynoszącej 240 [m²]. Analizie poddano okno oraz okno balkonowe zlokalizowane na parterze budynku. Obliczenia przeprowadzono z uwzględnieniem ich powierzchni oraz parametrów cieplnych, co umożliwiło określenie strat i zysków energii.

Tab. 1. Zestawienie strat i zysków ciepła analizowanego okna dla kolejnych miesięcy roku (opracowanie własne na podstawie PN-EN ISO 10211-2)

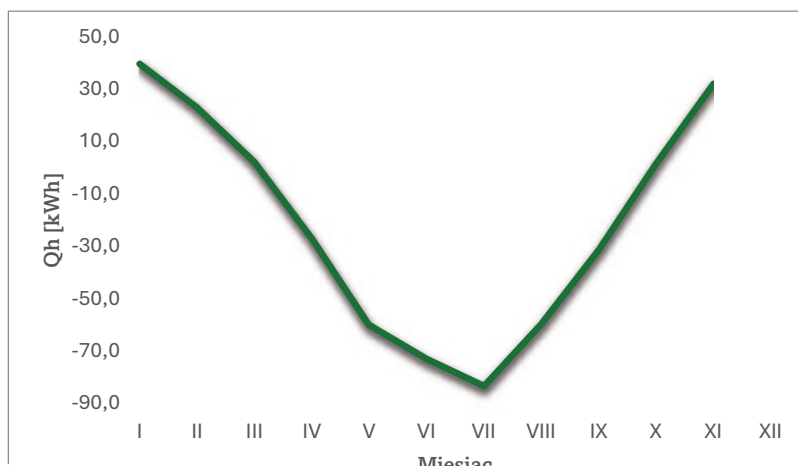
	Cały rok	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
T_e [st. C]	7,238	-2,55	-0,01	2,46	6,66	11,4	15,81	18,36	16,84	12,74	6,43	-0,08	-1,21
L_d [d]	365	31	28	31	30	31	30	31	31	30	31	30	31
t_M [h]	8760	744	672	744	720	744	720	744	744	720	744	720	744
$T_i - T_e$ [st. C]	12,76	22,55	20,01	17,54	13,34	8,6	4,19	1,64	3,16	7,26	13,57	20,08	21,21
Q_{zo} [kWh]	392,0	59,0	47,3	45,9	33,8	22,5	10,6	4,3	8,3	18,4	35,5	50,9	55,5
$T_e \cdot L_d$	2657,3	-79,05	-0,28	76,26	199,8	353,4	474,3	569,16	522,04	382,2	199,33	-2,4	-37,51
Q_s [kWh]	586,32	19,09	24,00	43,40	60,60	82,29	83,41	87,45	67,85	49,52	33,80	18,52	16,40
Q_h [kWh]	-194,34	39,9	23,3	2,5	-26,8	-59,8	-72,8	-83,2	-59,6	-31,1	1,7	32,3	39,1
U_r [W/m ² K]	-63,90	1,20	0,88	0,10	-1,41	-4,72	-12,19	-34,42	-12,80	-3,01	0,09	1,13	1,25

W tabeli 1 rozpatrujemy przypadek okna o wymiarach 1,8x1,1 [m], w którym analizujemy następujące roczne wartości: T_e – temperatura zewnętrzna [°C]; L_d – liczba dni w danym miesiącu [d]; t_M – czas w godzinach [h]; $T_i - T_e$ – różnica temperatur pomiędzy warstwami [°C]; Q_{zo} – straty ciepła [kWh]; $T_e \cdot L_d$ – iloczyn temperatury zewnętrznej oraz liczby dni; Q_s – zysk ciepła [kWh]; Q_h – bilans zysków i strat ciepła [kWh]; U_r – współczynnik przenikania szyby okna [W/m² · K]. Wartości przedstawione w tabeli pokazują wyraźną zależność strat i zysków ciepła od warunków zewnętrznych. W miesiącach zimowych, przy niskich temperaturach zewnętrznych i dużej różnicy temperatur ($T_i - T_e$), obserwuje się najwyższe straty ciepła przez okno. Wraz ze wzrostem temperatu-

ry zewnętrznej w okresie letnim straty maleją, a dominują zyski ciepła, co prowadzi do



Rys. 3. Wykres strat i zysków ciepła analizowanego okna w ciągu roku (opracowanie własne)



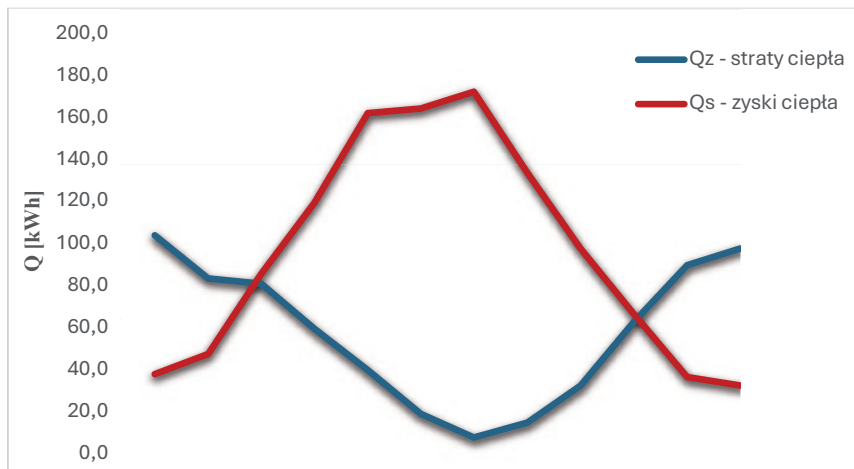
Rys. 4. Roczny bilans ciepła analizowanego okna (opracowanie własne)

Wykres na rys. 3 przedstawia straty oraz zyski ciepła, natomiast rys. 4 ukazuje bilans ciepła. Mimo sezonowej przewagi strat ciepła zimą, wysokie zyski z promieniowania słonecznego sprawiają, że roczny bilans energetyczny okna jest ujemny. Dzięki temu analizowany element stanowi źródło pasywnych zysków energii, dostarczając w skali roku więcej ciepła niż ucieka przez niego w wyniku przenikania.

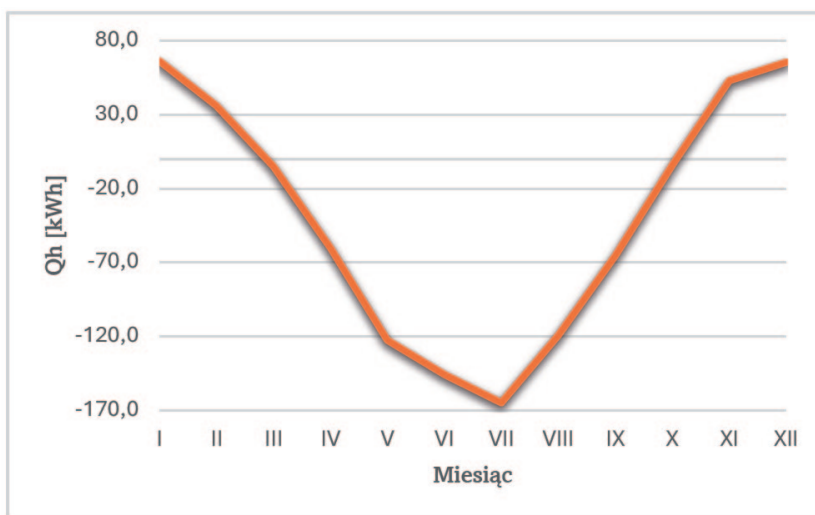
Tab. 2. Zestawienie strat i zysków ciepła drzwi balkonowych dla kolejnych miesięcy roku (opracowanie własne na podstawie PN-EN ISO 10211-2)

	Cały rok	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
T_e [st. C]	7,238	-2,55	-0,01	2,46	6,66	11,4	15,81	18,36	16,84	12,74	6,43	-0,08	-1,21
L_d [d]	365	31	28	31	30	31	30	31	31	30	31	30	31
t_M [h]	8760	744	672	744	720	744	720	744	744	720	744	720	744
$T_i - T_e$ [st. C]	12,76	22,55	20,01	17,54	13,34	8,6	4,19	1,64	3,16	7,26	13,57	20,08	21,21
Q_z [kWh]	689,8	103,9	83,2	80,8	59,5	39,6	18,7	7,6	14,6	32,4	62,5	89,5	97,7
$T_e \cdot L_d$	2657,3	-79,05	-0,28	76,26	199,8	353,4	474,3	569,16	522,04	382,2	199,33	-2,4	-37,51
Q_s [kWh]	1155,15	37,61	47,29	85,51	119,38	162,12	164,33	172,30	133,67	97,57	66,58	36,48	32,32
Q_b [kWh]	-465,32	66,3	36,0	-4,7	-59,9	-122,5	-145,7	-164,7	-119,1	-65,2	-4,1	53,0	65,4
U_r [W/m²K]	-130,38	1,99	1,35	-0,18	-3,15	-9,67	-24,38	-68,19	-25,59	-6,30	-0,20	1,85	2,09

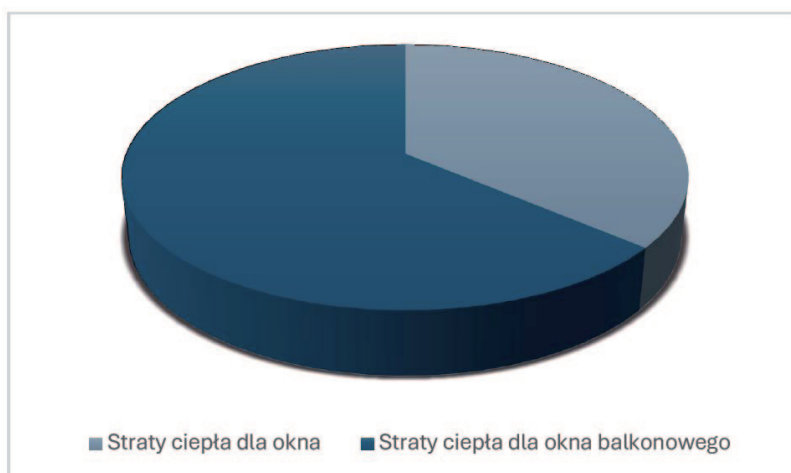
Tabela 2 analogicznie przedstawia wartości dla okna balkonowego, z których można zaobserwować różnice pomiędzy dwoma przegrodami przezroczystymi, które głównie wynikają z większych wymiarów drzwi balkonowych, co wiąże się z większą powierzchnią przenikania oraz dłuższą linią mostków cieplnych.



Rys. 5. Wykres strat i zysków ciepła drzwi balkonowych w ciągu roku (opracowanie własne)

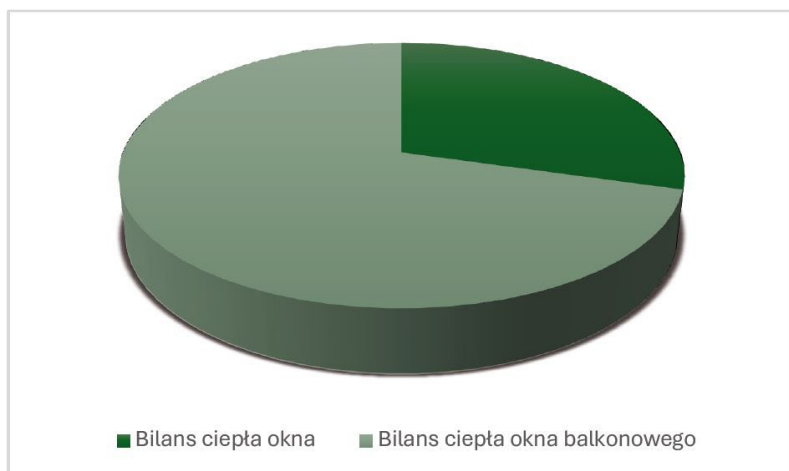


Rys. 6. Roczny bilans ciepła drzwi balkonowych (opracowanie własne)



Rys. 7. Porównanie strat ciepła dla okna oraz okna balkonowego (opracowanie własne)

Rysunek 7. jest podsumowaniem analizy wykonanej na rysunkach 3. oraz 5. Z rysunku wynika, że okno balkonowe generuje większe straty ciepła wynikające głównie z metrażu.



Rys. 8. Porównanie rocznego bilansu ciepła okna i okna balkonowego (opracowanie własne)

Wnioski

Przeprowadzona analiza wykazuje, że okna oraz ich połączenia ze ścianami zewnętrznymi są krytycznymi elementami kształtującymi efektywność energetyczną budynku, gdyż charakteryzują się znacznie niższą izolacyjnością niż przegrody nieprzezroczyste. W miejscu montażu okien dochodzi do przerwania ciągłości izolacji, co sprzyja powstawaniu liniowych mostków cieplnych, które prowadzą do intensywnego przepływu energii.

Analiza parametrów okna i drzwi balkonowych potwierdza ścisłą korelację między różnicą temperatur a stratami ciepła, które osiągają maksimum w styczniu (odpowiednio 59,0 kWh i 103,9 kWh). Mimo większych strat zimą większe przeszklenia oferują korzystniejszy całoroczny bilans energetyczny w porównaniu do okien standardowych. Wykorzystanie diagnostyki termowizyjnej do eliminacji mostków cieplnych ma znaczenie strategiczne, gdyż ogrzewanie pomieszczeń odpowiada za około 40% krajowego zużycia energii.

W związku z większymi stratami ciepła wynikającymi z dłuższych mostków liniowych w przypadku okna balkonowego konieczne jest zapewnienie odpowiednio większego obciążenia cieplnego. Dodatkowe zapotrzebowanie na ciepło prowadzi do wzrostu zużycia energii, a tym samym do wyższych kosztów eksploatacyjnych. Większa powierzchnia przegrody przezroczystej, przy nieprawidłowo wykonanych mostkach cieplnych, powoduje zwiększone straty energii oraz większy ślad węglowy.

Uzyskane wyniki wskazują, że ograniczenie mostków termicznych w strefie montażu okien może przyczynić się do zmniejszenia strat energii oraz poprawy efektywności energetycznej budynku. Redukcja kosztów eksploatacyjnych dla rozpatrywanego budynku jest możliwa poprzez poprawę termoizolacyjności połączenia okna z przegrodą ze-

wnętrzną. Ograniczenie mostków cieplnych zmniejsza straty ciepła, a tym samym zapotrzebowanie na energię do ogrzewania. Skutecznymi rozwiązaniami mogłyby być m.in. maty aerożelowe charakteryzujące się bardzo dobrą izolacyjnością przy niewielkiej grubości, oraz pianka PUR zapewniająca szczelne wypełnienie przestrzeni wokół ramy okiennej. Dodatkową poprawę efektywności energetycznej można uzyskać poprzez zastosowanie nowoczesnych okien o niższym współczynniku przenikania ciepła oraz wykonanie ciepłego montażu.

Bibliografia

- Asdrubali F., Baldinelli G., Bianchi F., 2011, *A quantitative methodology to evaluate thermal Bridges in buildings*. „Applied Energy” 97 (2012), s. 365-373.
- Gao Y., Roux J.J., Zhao L.H. 2007, *A low-order thermal bridge dynamic model for building simulation*, Proceedings: Building Simulation 2007, s. 281-286.
- Kaczkowska A., 2013, *Podstawowe izolacje budowlane*, Krosno.
- Kasperkiewicz K., 2018, *Termomodernizacja budynków*, Warszawa.
- Ministerstwo Infrastruktury i Budownictwa, 2016, *Poradnik w zakresie poprawy charakterystyki energetycznej budynków*, Warszawa, s. 28-30.
- PN-EN 13187: 2001. *Właściwości cieplne budynków – Jakościowa detekcja wad cieplnych w obudowie budynku – Metoda podczerwieni*.
- PN-EN ISO 10077-1: 2017-10. *Cieplne właściwości użytkowe okien, drzwi i żaluzji - Obliczanie współczynnika przenikania ciepła - Część 1: Postanowienia ogólne*.
- PN-EN ISO 10211-2: 2002-01. *Mostki cieplne w budynkach – Obliczanie strumieni cieplnych i temperatury powierzchni – Część 2: Liniowe mostki cieplne*.
- Rutkowska G., Klepak O., Podawca K. 2013, *Problemy strat ciepła w istniejących budynkach jednorodzinnych w kontekście błędów wykonawczych*, Warszawa.
- Smusz R., Bałon P., Kielbasa B., Rejman E., Bembenek M., Kowalski Ł. 2023, *Experimental and Numerical Characterization of Thermal Bridges in Windows*, “Advances in Science and Technology Research Journal”.
- Starakiewicz A., Szyszka J. 2009, *Fizyka budowli w zadaniach*, Rzeszów.
- <https://www.testo.com/pl-PL/budownictwo/termografia-budownictwa#diagnosis> (dostęp 10.04.2026).