



**POLSKIE ZRZESZENIE
INŻYNIERÓW I TECHNIKÓW
SANITARNYCH**

CZASOPISMO WYDAWANE OD 1921 ROKU

Gaz Woda i Technika Sanitarna

Gas Water & Sanitary Engineering

1

2026

Czasopisma Polskiego Zrzeszenia
Inżynierów i Techników Sanitarnych
w nowej odsłonie



Ciepłownictwo Ogrzewnictwo Wentylacja

Miesięcznik wydawany od 1969 roku



Gaz Woda i Technika Sanitarna

Gas Water & Sanitary Engineering

Gaz Woda i Technika Sanitarna

Miesięcznik wydawany od 1921 roku

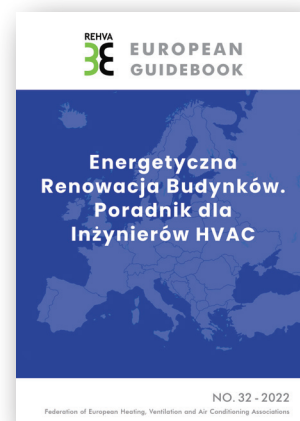
1

2026

www.gwits.pl

cena: 18,50 zł (w tym VAT 8%)

Zapisz się na prenumeratę czasopism,
a otrzymasz **bezpłatnie** e-poradnik:
„REHVA GB.32: Energetyczna renowacja
budynków. Poradnik dla inżynierów HVAC”



Dołącz już dziś do grona specjalistów
i otrzymuj od stycznia bezpłatną
prenumeratę czasopism PZITS.



Więcej szczegółów na stronie:
www.pzits.pl/prenumerata



KOLEGIUM REDAKCYJNE / Editorial Board

REDAKTOR NACZELNY / Editor in Chief

prof. dr hab. inż. Andrzej J. Osiadacz

ZASTĘPCA REDAKTORA NACZELNEGO / Deputy Editor in Chief

dr inż. Piotr Jadwiszczak

REDAKTORZY / Editors

dr hab. inż. Zbysław Dymaczewski – Politechnika Poznańska

dr hab. inż. Wojciech Kostowski – Politechnika Śląska

prof. dr hab. inż. Beata Kowalska – Politechnika Lubelska

dr hab. inż. Małgorzata Kwestarż – Politechnika Warszawska

dr inż. Piotr Manczarski – Politechnika Warszawska

dr hab. inż. Jerzy Mikosz – Politechnika Krakowska

dr Grzegorz Rosłonek – ORLEN S.A.

dr inż. Katarzyna Umiejewska – Politechnika Warszawska

RADA PROGRAMOWO-NAUKOWA / Scientific and Program Council

prof. dr hab. inż. Stanisław Nagy – Przewodniczący Rady –
Akademia Górniczo-Hutnicza

prof. Antonio Albuquerque – University of Beira Interior,
Portugalia

prof. dr hab. inż. Andrzej Białowiec – Uniwersytet Przyrodniczy
we Wrocławiu

prof. dr hab. inż. Waldemar Kamrat – Politechnika Gdańska

dr hab. inż. Dariusz Kowalski – Politechnika Lubelska

dr Ricardo Bolado Lavin – European Commission, Joint
Research Centre, Petten

Myroslav Malovanyy, Ph.D., D.Sc., professor – Lviv National
Polytechnic University

dr Kiran Tota-Maharaj – Aston University

mgr inż. Marcin Nocoń – ORLEN S.A.

prof. dr hab. inż. Marcin Zieliński – Uniwersytet Warmińsko-
Mazurski

ADRES REDAKCJI / Editorial address

ul. Czackiego 3/5 pokój 217, 00-043 Warszawa

e-mail: redakcja@gwits.pl

WYDAWNICTWO / Publisher

POLSKIEGO ZRZESZENIA INŻYNIERÓW

I TECHNIKÓW SANITARNYCH

ul. Czackiego 3/5 pokój 217, 00-043 Warszawa, tel: 22 826 28 94

e-mail: wydawnictwo@pzits.pl, www.pzits.pl

Szczegóły prenumeraty: www.pzits.pl/prenumerata

DRUK / Printing

Zakład Poligrafii i Kolportażu Wydawnictwo SIGMA-NOT Sp. z o.o.

ul. Ks. J. Popiełuszki 19/21, 01-595 Warszawa

Miejsce i data wydania: Warszawa 01/2026

Nakład: 180 egzemplarzy

INFORMACJE / Journal info

Wersja pierwotna: elektroniczna

Czasopismo GWiTS znajduje się w wykazie czasopism
naukowych Ministerstwa Nauki i Szkolnictwa Wyższego.

Czasopismo GWiTS znajduje się w bazach czasopism
technicznych: BazTech, Index Copernicus ICV 2024 = 82.36.

Artykuły publikowane w GWiTS otrzymują numer DOI (Digital
Object Identifier). Są rejestrowane w bazie danych CrossRef. Są
publikowane online w otwartym dostępie (Open Access).

Artykuły w otwartym dostępie na licencji Creative Commons
CC BY 4.0. Licencjobiorcą jest PZITS.

PRZESYŁANIE ARTYKUŁÓW / Submission

Przesyłanie artykułów i wytyczne dla autorów / [Article
submission and author guidelines](#) www.gwits.pl

SPIS TREŚCI / Contents

Andrzej Żero, Wojciech Grządzielski

Sieci gazowe – odrzucona czy niedoceniona wartość
dodana transformacji energetycznej

Gas grid – rejected or underestimated added value of the
energy transformation 2

Klaudia Kwiatkowska

Biofilmy w instalacjach wodnych – mechanizm
powstawania oraz metody ich ograniczenia

Biofilms in water systems – formation mechanism and
methods of reduction 8

*Klaudia Kałasz, Konrad Glura, Alicja Szymańska, Mariusz
Ślachciński, Grzegorz M. Szymański, Bogdan Wyrwas*

Ocena efektywności redukcji zanieczyszczeń przez
oczyszczalnię komunalną w gminie Poniec

Assessment of the effectiveness of pollution reduction
by the municipal wastewater treatment plant in the
Poniec commune 13

Witold Paleczek

Hydrodynamika płetw w projektowaniu pływających
robotów humanoidalnych dla budownictwa
hydrotechnicznego i techniki sanitarnej

Fin Hydrodynamics in the Design of Swimming
Humanoid Robots for Hydraulic Engineering and
Sanitary Technology 18

Monika Humaj, Jerzy Mikosz, Gian Francesco Meloni

Mikrobiologiczne ogniwa paliwowe: ewolucja technologii
i perspektywy jej wykorzystania

Microbial Fuel Cells: The Evolution of the Technology
and Prospects for its Use 26

Wojciech Kramarek

Energetyka fuzyjna jako przyszłość energetyki światowej

Fusion energy as the future of global energy 32

Z ŻYCIA PZITS 40

Wszystkie opublikowane artykuły
dostępne są w otwartym dostępie
(Open Access) na stronie:

All published manuscripts are
available online in Open Access:

www.gwits.pl

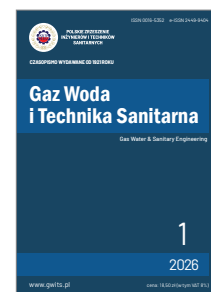


facebook.com/GazWoda



linkedin.com/company/gazwoda/





Sieci gazowe – odrzucona czy niedoceniona wartość dodana transformacji energetycznej

Gas grid – rejected or underestimated added value of the energy transformation

Andrzej Żero^{1*}, Wojciech Grządzielski²

¹ Państwowa Akademia Nauk Stosowanych im. I. Mościckiego w Ciechanowie, Wydział Inżynierii i Ekonomii, Polska Spółka Gazownictwa sp. z o.o.

² Polska Spółka Gazownictwa sp. z o.o.

* Kontakt / Correspondence: andrzej.zero@pansim.edu.pl

Streszczenie:

Artykuł podejmuje problematykę roli i znaczenia sieci gazowych w kontekście transformacji energetycznej oraz realizacji krajowych strategii klimatyczno-energetycznych – Polityki Energetycznej Polski do 2040 roku, Krajowego Planu w dziedzinie Energii i Klimatu oraz Krajowego Planu Renowacji Budynków. Autorzy wskazują, że infrastruktura gazowa, mimo postępującej elektryfikacji i dominacji odnawialnych źródeł energii, stanowi istotny i wciąż niedoceniany element systemu energetycznego, umożliwiający stabilizację pracy sieci elektroenergetycznych oraz efektywne wykorzystanie odnawialnych i niskoemisyjnych gazów. Analiza danych krajowych strategii klimatyczno-energetycznych wskazuje na docelowy spadek zużycia gazu ziemnego do 2040 r., przy równoczesnym wzroście udziału biometanu. Tym samym prognozy dla sektora dystrybucji gazu pokazują zmiany w strukturze wolumenu dystrybucji paliw gazowych. Oznacza to możliwość pokrycia krajowego zapotrzebowania na paliwa gazowe z zasobów krajowych, co znacząco zwiększa bezpieczeństwo energetyczne. W dalszej części pracy przedstawiono analizę stabilności pracy biometanowni w Europie oraz biogazowni w Polsce. Porównanie wskazuje główne czynniki wpływające na ich dostępność, do których zaliczyć można regulacyjne, finansowe oraz techniczne. Autorzy podkreślają, że biometanownie, jako stabilne źródła energii, mogą stanowić istotny element bilansowania systemu energetycznego oraz przyczynić się do dekarbonizacji gospodarki. Wnioski wskazują, że sieci gazowe i technologie gazowe nie powinny być marginalizowane w procesie transformacji energetycznej. Ich integracja z sektorem odnawialnych źródeł energii oraz rozwój produkcji biometanu mogą stanowić kluczowy czynnik wspierający dekarbonizację, bezpieczeństwo energetyczne i wykorzystanie lokalnych zasobów energetycznych.

Słowa kluczowe: transformacja energetyczna, sieci gazowe, biometan, dekarbonizacja, bezpieczeństwo energetyczne

Abstract:

This article addresses the role and importance of gas networks in the context of energy transition and the implementation of national climate and energy strategies – Poland's Energy Policy until 2040, the National Energy and Climate Plan, and the National Building Renovation Plan. The authors point out that gas infrastructure, despite ongoing electrification and the dominance of renewable energy sources, is a crucial and still underestimated element of the energy system, enabling the stabilization of power grids and the efficient use of renewable and low-carbon gases. Analysis of data from national climate and energy strategies indicates decrease of a target natural gas consumption by 2040, with a simultaneous increase share of biomethane. Consequently, forecasts for the gas distribution sector show changes in the structure of gaseous fuel distribution volumes. This means that domestic demand for gaseous fuels can be met from domestic resources, significantly increasing energy security. The paper then presents an analysis of the stability of biomethane plants in Europe and biogas plants in Poland. The comparison identifies the main factors influencing their availability, including regulatory, financial, and technical factors. The authors emphasize that biomethane plants, as stable energy sources, can be a crucial element in balancing the energy system and contribute to the decarbonization of the economy. Their conclusions indicate that gas networks and gas technologies should not be marginalized in the energy transition process. Their integration with the renewable energy sector and the development of biomethane production can be a key factor supporting decarbonization, energy security, and the use of local energy resources.

Keywords: energy transformation, gas networks, biomethane, decarbonization, energy security

1. Wprowadzenie

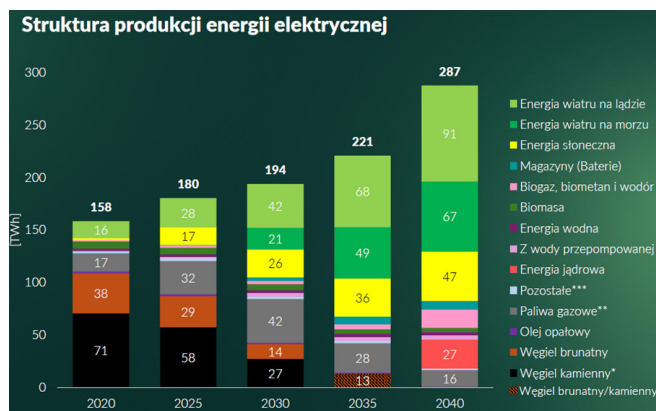
Transformacja energetyczna opiera się na trzech głównych filarach: (i) zapewnieniu przystępnych cenowo i bezpiecznych dostaw energii, (ii) stworzeniu w pełni zintegrowanego, wzajemnie połączonego i cyfrowego rynku energii oraz (iii) nadaniu priorytetu efektywności energetycznej, w tym poprawieniu charakterystyki energetycznej budynków oraz rozwojowi sektora energetycznego opartego głównie na źródłach odnawialnych [1]. Uzupełnieniem i niejako rozwinięciem na obszarze krajowym wskazanych filarów jest Polityka Energetyczna Polski do 2040 r. (PEP2040) [2], która również wskazuje trzy główne filary polskiej polityki energetycznej (i) sprawiedliwa transformacja, (ii) zeroemisyjny system energetyczny oraz (iii) dobra jakość powietrza.

Równolegle używany zwrot zrównoważony rozwój systemów energetycznych czy zrównoważone planowanie tych systemów obejmuje tematycznie transformację energetyczną, w której szczególnie istotny jest aspekt poprawy efektywności energetycznej, poprawy zarządzania zapotrzebowaniem na energię czy integracji sektorów. Zauważyć można podejmowane na szeroką skalę działania w zakresie wzrostu wykorzystania odnawialnych źródeł energii, w szczególności w zakresie elektryfikacji, przy jednocześnie dość marginalnym wykorzystaniu szans jakie mogą dać sieci gazowe. Wśród unijnych kierunków energii i Zielonego Ładu zidentyfikowane są działania w zakresie: (i) strategii dotyczącej integracji systemu energetycznego, (ii) strategii dotyczącej wodoru, (iii) strategii na rzecz energii z morskich źródeł odnawialnych, (iv) fali renowacji, (v) strategii dotyczącej metanu, (vi) transeuropejskich sieci energetycznych [1].

Można odnieść wrażenie, że sieci gazowe wraz z instalacjami i technologiami energetycznego wykorzystania paliw gazowych są odrzucane bądź niedocenione w wymienionych wcześniej działaniach transformacji energetycznej. Przecież zwiększenie wykorzystania czystych źródeł energii, to również szerokie wykorzystanie odnawialnych i niskoemisyjnych gazów. Zarówno sieci gazowe, instalacje i technologie gazowe, to narzędzia w transporcie odnawialnych i niskoemisyjnych gazów jak również narzędzia umożliwiające redukcję emisji gazów cieplarnianych oraz narzędzia do stabilizacji pracy sieci elektroenergetycznych i szerszego wykorzystania odnawialnych źródeł energii. Wszystko to ma na celu ogólnie ograniczenie negatywnego wpływu działalności człowieka na klimat i środowisko.

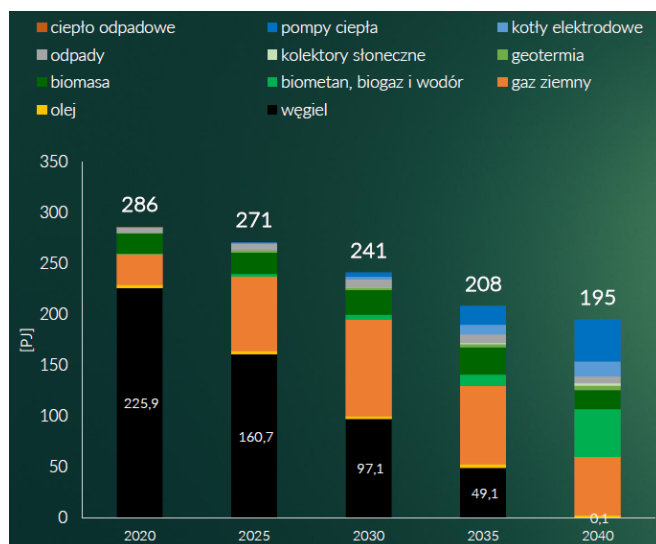
2. Plany w zakresie dekarbonizacji

W związku z opublikowaną aktualizacją Krajowego Planu w dziedzinie Energii i Klimatu z perspektywą do 2040, tj. aKPEiK wersja 07.2025 r. [3] w artykule przedstawiono analizę danych zawartych w projekcie aktualizacji. Celem analizy nie była ocena tego dokumentu a analiza przedstawionych wyników i skutków na sektor gazowy – w szczególności działalność gazowych operatorów sys-



Rys. 1. Struktura paliw do produkcji energii elektrycznej [4]

Fig. 1. The structure of fuels for electricity production [4]



Rys. 2. Struktura paliw do produkcji energii cieplnej [4]

Fig. 2. The structure of fuels for heating production [4]

temu dystrybucyjnego (OSD). W planach tego dokumentu przedstawiono strukturę zapotrzebowania na energię pierwotną dla produkcji energii elektrycznej i ciepła, co przedstawiono na Rysunku 1 i 2 [4].

Zauważyć można wyraźny spadek udziału paliw kopalnych w miksie energetycznym w produkcji energii elektrycznej i ciepła. W scenariuszu WAM¹ odpowiednio udział OZE w produkcji energii elektrycznej w roku 2040 ma wynosić około 80% a w przypadku produkcji ciepła około 68%.

Z perspektywy sieci gazowych najważniejsze wydają się plany w zakresie wykorzystania gazu ziemnego, biometanu czy wodoru. Skupiając się jedynie na zakresie dotyczącym gazu ziemnego i biometanu widać, że aKPEiK zakłada znaczący spadek zużycia paliwa gazowego w stosunku do prognozowanego szczytu z lat 2025–2030. Analizując scenariusz WAM na podstawie załącznika nr 1 prognozę zapotrzebowania na paliwa gazowe w zakresie gazu ziemnego i biometanu przedstawia Tabela 1. Widać wyraźnie, że w perspektywie roku 2040 udział paliw odnawialnych, czyli biometanu rośnie do około 26%.

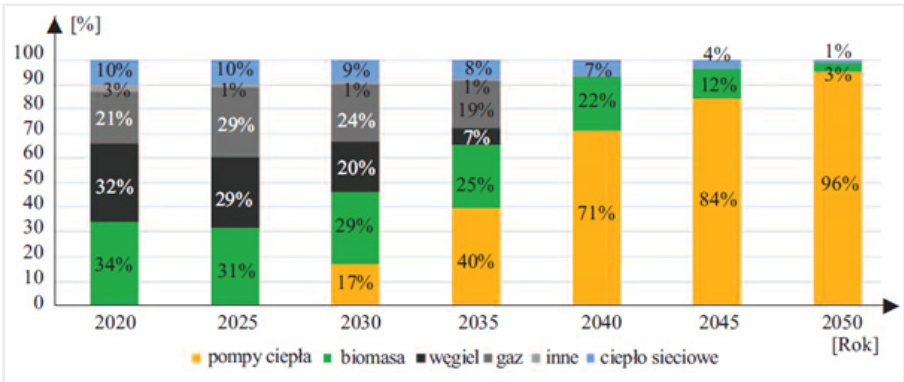
¹ WAM (ang. with additional measures) – scenariusz aktywnej transformacji

Tabela 1. Prognoza zapotrzebowania paliwa gazowego w zakresie gazu ziemnego i biometanu, opracowanie własne na podstawie [3]
Table 1. Forecast of gas fuel demand in the field of cold gas and biomethane, own study based on [3], data in billion m³

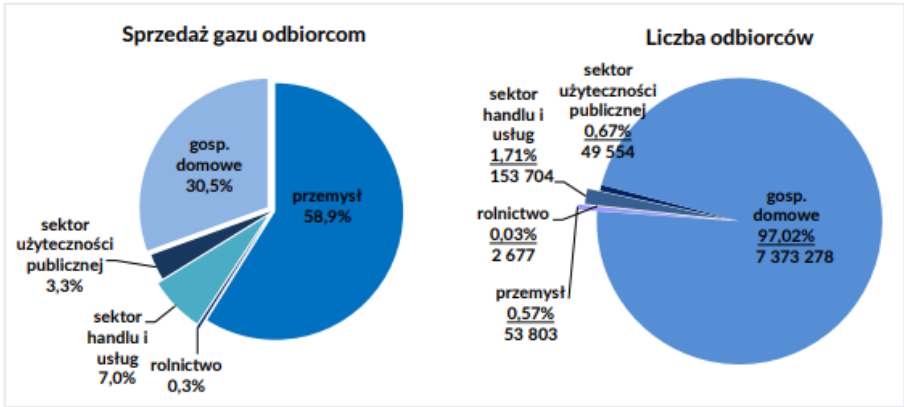
Rodzaj paliwa	2025	2030	2035	2040
Biometan [mld m ³]	0,06	1,39	2,75	3,66
Gaz ziemny [mld m ³]	21,35	20,76	15,00	10,36
Razem [mld m ³]	21,41	22,11	17,75	14,02
Udział biometanu	0,28%	6,31%	15,47%	26,19%

Kolejnym istotnym dokumentem mogącym mieć duży wpływ na rynek paliw gazowych jest projekt Krajowego Planu Renowacji Budynków tj. KPRB [5]. Analizę tego dokumentu i skutków przedstawia [8]. Według KPRB prognoza zapotrzebowania na ciepło z gazu dla budynków jednorodzinnych wskazuje na wycofanie tego paliwa w perspektywie 2040 roku (Rysunek 3).

Podobna sytuacja ma miejsce w przypadku budynków wielorodzinnych czy użyteczności publicznej. Pomijając czy taki plan jest realny w zakładanej perspektywie to jego materializacja, nawet w dużej części, może przynieść istotne skutki dla operatorów systemów gazowych. Oczywiście jest również, że w tym zakresie wpływ zmian na Operatora Systemu Przesyłowego (OSP) będzie diametralnie inny niż w przypadku OSD. Bazując na strukturze sprzedaży paliw gazowych przedstawionych w Sprawozdaniu z monitorowania paliw gazowych za okres od dnia



Rys. 3. Źródła ciepła budynków jednorodzinnych wg KPRB [6]
Fig. 3. Heat sources for single-family buildings [6]



Rys. 4. Struktura sprzedaży paliw gazowych w 2023 r. [7]
Fig. 4. Gas fuel sales structure in 2023 [7]

1 stycznia 2023 do dnia 31 grudnia 2023 r. [9] można by założyć, że wolumeny do odbiorców z sektora gospodarstw domowych czy też użyteczności publicznej w perspektywie roku 2040 w scenariuszu, w którym renowacja budynków materializuje się zgodnie z planem, mogą się zmniejszyć nawet o około 100%. Strukturę sprzedaży paliw gazowych za rok 2023 przedstawia Rysunek 4.

Skupiając się zatem na sektorze gazowym działalności OSD, w celu określenia potencjalnego wpływu planów wynikających aKPEiK [3] i Krajowego Planu Renowacji Budynków [5], przyjęto następujące założenia:

- na podstawie raportu przygotowanego przez European Biogas Association (EBA) Statistical Report 2024 [8] (European Biogas Association 2024) w zakresie przyłączeń biometanowni do sieci gazowej przyjęto założenie, że 20% wolumenu biometanu zostanie wtłoczone do sieci przesyłowej a od 70%–80% do sieci dystrybucyjnej,
- na podstawie wolumenu dystrybucji gazu Polskiej Spółki Gazownictwa za 2024, który według [9] wynosił 11,94 mld m³, oraz informacji, że PSG zarządza około 95,1% sieci dystrybucyjnej w kraju [7], przyjęto proste założenie, że krajowy wolumen dystrybucji to około 13 mld m³, co według szacunków stanowi około 65%–70% wolumenu paliwa gazowego w Polsce,
- założyć również można, że spadek zapotrzebowania na paliwo gazowe w sektorze odbiorców indywidualnych, wielorodzinnych czy użyteczności publicznej w perspektywie 2040 może sięgnąć 100% wolumenu,

- wg aKPEiK [3] źródła wytwórcze ciepła i energii elektrycznej będą wykorzystywały odnawialne źródła energii od około 80% – 70%, co w przełożeniu na paliwa gazowe (w szczególności na gaz ziemny) oznacza, że będą one wykorzystywane, jako stabilizator systemu lub źródła szczytowe.

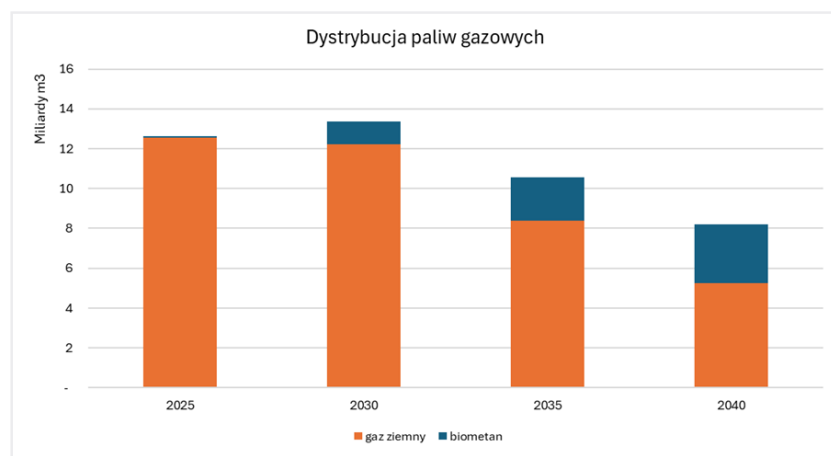
Biorąc powyższe pod uwagę można zaprognozować zmianę struktury dystrybucji gazu ziemnego w perspektywie roku 2040, która może wynieść od 8,18–9,04 mld m³ w stosunku do około 12,6 mld m³ obecnie. Należy przy tym zwrócić uwagę, że przy przyjętych założeniach udział biometanu w sieciach dystrybucyjnych może docelowo stanowić około 3 mld m³ co oznacza, że jego udział będzie zawierać się w przedziale około 33%–36% wolumenu dystrybucji paliw gazowego.

W perspektywie lat 2025-2040 zmiany w sektorze dystrybucji w oparciu o maksymalną materializację założeń [3] [5] przedstawia Rysunek 5.

Reasumując, z powyższych wyliczeń wynika, że dla OSD obecność biometanu w sieci dystrybucyjnej stanowić może „poduszkę bezpieczeństwa”

zmniejszając ryzyko zmniejszenia poziomu wolumenu dystrybucji paliw gazowych. Dodatkowo obecność biometanu w sieci gazowej to również zwiększenie bezpieczeństwa energetycznego kraju w ujęciu makroregionalnym czy lokalnym. Uwzględniając prognozy na 2040 r. poziom dystrybucji paliw gazowych w kraju może wynieść na poziomie 8,18–9,04 mld m³, z czego biometanu około 3 mld m³ a krajowego wydobycia gazu ziemnego na poziomie 1,8 mld m³ [10]. Daje to finalnie około 53–59% pokrycia zapotrzebowania na paliwa gazowe w segmencie dystrybucji polegając na zasobach własnych krajowych, czyli bez konieczności importu.

Natomiast prognozowany wolumen biometanu stanowi na tyle duży udział w systemie dystrybucyjnym, że wiedza o ciągłości i stabilności pracy biometanowni dostarczających biometan do sieci gazowych będzie istotną kwestią w zarządzaniu bezpieczeństwem dostaw paliwa gazowego do odbiorców.



Rys. 5. Prognozowane zmiany wolumenów dystrybucji paliwa gazowego w okresie 2025–2040, opracowanie własne

Fig. 5. Forecasted changes in the volume of gas fuel distribution in the period 2025–2040, own study

3. Stabilność pracy biogazowni/biometanowni

Z przykładów pracy obecnie funkcjonujących biometanowni w Europie, instalacje zatłaczania biometanu traktowane są jako stabilne źródła dostaw energii. Zwyczajowo, jako założenie planistyczne, przyjmowana w analizach jest wartość ok. 8000 h/rok [8], co inaczej ujmując oznacza że, łączny czas niedyspozycyjności odpowiada ok. 1 miesiąca.

Analizując dane o wielkości rocznej produkcji i mocach zainstalowanych biometanowni w wybranych krajach (Tabela 2), wynika że czas ich pracy zawiera się pomiędzy 4168–8087 h/rok, co charakteryzuje ich dostępność na poziomie 48–92%.

Nasuwa się pytanie skąd takie rozstęp w czasie pracy biometanowni? Wpływają na to czynniki [18–21], które można pogrupować na:

- techniczno-organizacyjne, m.in. dostępność i logistyka dostawy substratów (sezonowość i magazynowanie), wymagania związane z wykonywaniem prac modernizacyjnych i serwisowych (planowane przestoje na potrzeby przeglądów, kontroli i prac serwisowych), utrzymanie parametrów jakościowych biometanu względem parametrów gazu w sieci gazowej, przyjęte przez operatorów sieci zasady przyłączenia i działania związane z dostosowaniem sieci do ciągłego odbioru wytwarzanego biometanu z instalacji,
- finansowo-regulacyjne, m.in. krajowe systemy wsparcia (świadczenia pochodzenia, taryfy gwarantowane FiT (ang. Feed-in Tariff) i dopłaty do ceny rynkowej FiP (ang. Feed-in Premium), krajowe programy dotacji i pożyczek oraz zachęt podatkowych dla producentów biogazu/biome-

Tabela 2. Charakterystyka produkcji biometanu w wybranych krajach w latach 2022 i 2024, opracowanie własne na podstawie [8, 11–17]

Table 2. Characteristics of biomethane production in selected countries in 2022 and 2024, own study based on [8, 11–17]

2022 r.	Francja	Niemcy	Dania	Wielka Brytania	Szwecja	Jednostka
liczba biometanowni	514	252	53	97	71	[szt]
moc zainstalowana	87 691	147 711	70 105	107 029	45 421	[m ³ /h]
średnia moc biometanowni	171	586	1 323	1 103	640	[m ³ /h]
wielkość produkcji biometanu	6,9	12,8	5,6	6,5	2,7	[TWh]
	0,64	1,19	0,52	0,60	0,25	[mld m ³ /rok]
czas pracy	7 286	8 024	7 396	5 623	5 504	[h/rok]
2024 r.	Francja	Niemcy	Dania	Wielka Brytania	Szwecja	Jednostka
liczba biometanowni	731	255	58	116	135	[szt]
moc zainstalowana	132 818	147 749	85 117	114 358	97 757	[m ³ /h]
średnia moc biometanowni	182	579	1 468	986	724	[m ³ /h]
wielkość produkcji biometanu	11,6	12,753	7,26	8	4,4	[TWh]
	1,07	1,18	0,67	0,74	0,41	[mld m ³ /rok]
czas pracy	8 087	7 992	7 898	6 477	4 168	[h/rok]

tanu oraz operatorów sieci na dostosowanie sieci do ciągłego odbioru wytwarzanego biometanu z instalacji, skala działalności przedsiębiorstwa zajmującego się wytwarzaniem biogazu/biometanu (np. funkcjonowanie dużych przedsiębiorstw charakteryzuje się niską wrażliwością na zmiany czynników w otoczeniu biznesowym aniżeli małych przedsiębiorstw), krajowa polityka energetyczna i kierunki wykorzystania biometanu w sektorach gospodarki,

Dania obecnie posiada największy udział biometanu w sieci gazowej, stąd w sesji pytań i odpowiedzi [21] wskazano pytanie dotyczące skali przypadków braku utrzymania parametrów jakościowych biometanu względem parametrów gazu w sieci gazowej oraz wpływu na pracę sieci gazowej. W ocenie Evida (operatora sieci dystrybucyjnej) przypadki są częste, ale trwają krótko (kilka minut), w którym to czasie automatyka zamyka możliwość wprowadzenia biometanu do sieci i następuje poprawa parametrów jakościowych umożliwiając dalsze jego wprowadzanie. Natomiast przypadki te nie mają znaczącego wpływu na funkcjonowanie sieci gazowej powodując negatywne skutki dla operatora czy odbiorców końcowych.

Analizując rynek biogazu w Polsce [22] wynika, że w 2024 r. 197 instalacji biogazowych o łącznej mocy zainstalowanej 85,706 MW wyprodukowało 272,9 GWh energii elektrycznej, co w odniesieniu do skali roku pozycjonuje ich dostępność na poziomie 3184 h/rok (36%). W odniesieniu do ilości 125,33 GWh sprzedanej i wprowadzonej energii elektrycznej do sieci dystrybucyjnej wygląda to jeszcze gorzej, tzn. 1462 h/rok. Wynik ten jest porównywalny do wyników uzyskiwanych w tzw. „niestabilnych pogodozależnych” farm wiatrowych 1215–1397 h/rok czy fotowoltaicznych 575–804 h/rok. Wśród przyczyn tak niskich czasów wymienić można [23, 24]:

- przymusowe wyłączenia jednostek OZE podlegającym nierynkowemu redysponowaniu mocy, a zaktualizowana Instrukcja Ruchu i Eksploatacji Sieci Przesyłowej (IRiESP) jednoznacznie ujmuje biogazownie wytwarzające energię elektryczną w tej grupie jednostek pomimo powszechnej tezy wykorzystania biogazu do bilansowania pogodozależnych instalacji i tym samym wywołuje liczne pytania o rentowność tych instalacji,
- niepewność systemu wsparcia, tzn. kończące się w 2025 r. systemy FiT i FiP oraz ich dalsza dostępność tylko dla mniejszych instalacji, wygaszony system świadectw certyfikatów (zielone certyfikaty), zmiana progów mocy i zasad kwalifikacji biogazowni pod wsparcie oraz preferencji w kierunku wytwarzania biometanu, powodując ryzyko inwestycyjne na rynku biogazu.

Podsumowując czasy pracy i dyspozycyjność wytwarzania energii elektrycznej z biogazu a wytwarzania biometanu w biometanowniach, te drugie można zaliczyć do stabilnych źródeł energii. Natomiast w obu przypadkach czynniki finansowo-regulacyjne są główną determinantą dla ich ciągłej pracy oraz możliwości wykorzystania wytworzonej energii dla dekarbonizacji gospodarki.

4. Wnioski

Przedmiotowa praca to próba odpowiedzi na pytanie czy sieci gazowe są odrzuconą czy niedocenioną wartością dodaną transformacji energetycznej zważając na zachodzące zmiany na rynku i kierunki, jakie zostały określone w krajowych dokumentach planistycznych, tj. PEP2040, aKPEiK, KPRB. Ocena wyników przedstawionych w tych dokumentach wraz ze możliwymi skutkami oddziaływania na sektor gazowy była celem tej pracy. Ich diagnoza może być przydatna w diagnozie możliwych działań zarówno ze strony ustawodawcy, regulatora czy przedsiębiorstw energetycznych. Krajowe dokumenty planistyczne zakładają stabilny wzrost udziału biometanu w sieci gazowej przy jednoczesnym spadku zapotrzebowania na paliwa gazowe w ogrzewaniu budynków. Z tego względu wzrost znaczenia biometanu w sieci gazowej wpływać będzie zarówno na zmniejszenie skali redukcji poziomu dystrybucji paliw gazowych oraz na wzrost bezpieczeństwa energetycznego poprzez energetyczne wykorzystanie lokalnych zasobów gazu ziemnego i potencjału produkcji biometanu. W odniesieniu do tych drugich, kluczowym jest znajomość uwarunkowań stabilności pracy biogazowni i biometanowni. Wiedza o pracy biogazowni, ograniczeniach systemowych sieci gazowej czy sieci elektroenergetycznej oraz czynników finansowo-regulacyjnych wspierać może kształtowanie dla utrzymania ciągłości pracy tych obiektów oraz możliwości wykorzystania wytworzonej energii z biogazu i biometanu dla dekarbonizacji równych sektorów gospodarki.

Literatura

- [1] Komisja Europejska. *Energy and the European Green Deal*, Dostępne online: https://commission.europa.eu/strategy-and-policy/priorities-2019-2024/european-green-deal/energy-and-green-deal_pl (dostęp: 11 października 2025).
- [2] Ministerstwo Klimatu i Środowiska. *Polityka Energetyczna Polski do 2040 roku (PEP2040)*. Dostęp online: <https://www.gov.pl/web/polski-atom/uchwala-w-sprawie-polityki-energetycznej-polski-do-2040-r> (dostęp: 11 października 2025).
- [3] Ministerstwo Klimatu i Środowiska. *Projekt Krajowego Planu w dziedzinie Energii i Klimatu do 2030 r. z perspektywą do 2040 roku*. Dostęp online: <https://www.gov.pl/web/klimat/krajowy-plan-na-rzecz-energii-i-klimatu> (dostęp: 11 października 2025).
- [4] Ministerstwo Klimatu i Środowiska. *Plan na aktywną transformację energetyczno-klimatyczną. Bezpieczeństwo energetyczne, obniżenie cen energii i rozwój gospodarczy w Polsce*. Dostęp online: <https://www.gov.pl/web/klimat/plan-na-aktywna-transformacje-energetyczno-klimatyczna-bezpieczenstwo-energetyczne-obnizenie-cen-energii-i-rozwoj-gospodarczy-w-polsce> (dostęp: 11 października 2025).
- [5] Krajowa Agencja Poszanowania Energii (KAPE S.A.). *Projekt Krajowego Planu Renowacji Budynków 2024*. Dostęp online: <https://www.kape.gov.pl> (dostęp: 11 października 2025).

- [6] Gilewski, P.; Węglarz, A.; Janik, K.; Śniegocki, A.; Kwiatkowski, J.; Rajkiewicz, A.; Pilzak, H.; Junak, K.; Zdanowski, P. *Krajowy Plan renowacji Budynków w Polsce*. Materiały Budowlane 2025, 1 (629).
- [7] Ministerstwo Przemysłu. *Sprawozdanie z wyników monitorowania bezpieczeństwa dostaw paliw gazowych za okres od 1 stycznia 2023 r. do 31 grudnia 2023 r.* Warszawa, 2024.
- [8] European Biogas Association. *EBA Statistical Report 2024*. Dostęp online: https://www.europeanbiogas.eu/wp-content/uploads/2024/12/EBA_stats_report_comple-te_241204_preview.pdf (dostęp: 11 października 2025).
- [9] Polska Spółka Gazownictwa. *Projekt planu rozwoju w zakresie zaspokojenia obecnego i przyszłego zapotrzebowania na paliwa gazowe na lata 2024–2028*. Dostęp online: <https://www.psgaz.pl> (dostęp: 11 października 2025).
- [10] Filar, Bogdan, Mariusz Miziołek, Renata Cicha-Szot, Agnieszka Moska, Tadeusz Kwilosz i Tadeusz Szpunar. *Analiza możliwości zwiększenia pojemności czynnej podziemnych magazynów gazu w Polsce*. Nafta-Gaz, nr 9 (2024): 571–580. <https://doi.org/10.18668/NG.2024.09.05>.
- [11] Sia Partners. *Benchmark Europe Biomethane*. Dostęp online: https://www.sia-partners.com/system/files/document_download/file/2023-12/Sia%20Partners_Benchmark_Europe_Biomethane.pdf (dostęp: 11 października 2025).
- [12] Biogas Community. *European Biomethane Capacity Hits 7 Bcm*. Dostęp online: <https://biogascommunity.com/2025/06/30/european-biomethane-capacity-hits-7-bcm> (dostęp: 11 października 2025).
- [13] European Biogas Association. *European Biomethane Map 2025*. Association. Dostęp online: <https://www.european-biogas.eu/european-biomethane-map-2025/> (dostęp: 11 października 2025).
- [14] NATRA Group. *Gas Markets Press Release 2024*. Dostęp online: <https://www.natrangroupe.com/sites/default/files/pr/press-release-2024-gas-markets-04032025.pdf> (dostęp: 11 października 2025).
- [15] Bioenergy News. *UK Biomethane Is Valuable but Too Limited for Widespread Heating*. Dostęp online: [https://www.bioenergy-news.com/news/uk-biomethane-is-valuable-](https://www.bioenergy-news.com/news/uk-biomethane-is-valuable-but-too-limited-for-widespread-heating-new-report-says/)
- [but-too-limited-for-widespread-heating-new-report-says/](https://www.bioenergy-news.com/news/uk-biomethane-is-valuable-but-too-limited-for-widespread-heating-new-report-says/) (dostęp: 11 października 2025).
- [16] Forsyningstilsynet. *National Report 2025*. Dostęp online: <https://forsyningstilsynet.dk/Media/638924853153921019/2025%20National%20Report%20.pdf> (dostęp: 11 października 2025).
- [17] PwC. *Evoluzione del ruolo del biometano*. Dostęp online: <https://www.pwc.com/it/en/industries/energy-utilities1/evoluzione-ruolo-biometano.html> (dostęp: 11 października 2025).
- [18] IEA Bioenergy Task 37. *Biomethane Status 2014*. Dostęp online: <https://task37.ieabioenergy.com/wp-content/uploads/sites/32/2022/02/biomethane-status-2014.pdf> (dostęp: 11 października 2025).
- [19] Ó Céileachair, D., O'Shea, R., Murphy, J. D., & Wall, D. M. (2022). The effect of seasonal biomass availability and energy demand on the operation of an on-farm biomethane plant. *Journal of Cleaner Production*, 133129. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.133129>
- [20] International Energy Agency. *Outlook for Biogas and Biomethane*. Dostęp online: <https://iea.blob.core.windows.net/assets/5b757571-c8d0-464f-baad-bc30ec5ff46e/OutlookforBiogasandBiomethane.pdf> (dostęp: 11 października 2025).
- [21] Juran Benchmarking. *Implementing biomethane in transmission and distribution networks*. Dostęp online: <https://juranbenchmarking.com/implementing-biomethane-in-transmission-and-distribution-networks/> (dostęp: 11 października 2025).
- [22] Urząd Regulacji Energetyki. *Raport art. 17 za 2024 r.* Dostęp online: <https://bip.ure.gov.pl/download/3/19585/RAPORTart17za2024.pdf> (dostęp: 11 października 2025).
- [23] Magazyn Biomasa. *Operator sieci będzie mógł wyłączyć biogazownię*. Dostęp online: <https://magazynbiomasa.pl/operator-sieci-bedzie-mogl-wylaczyc-biogazownie/> (dostęp: 11 października 2025).
- [24] Najwyższa Izba Kontroli. *Biomasa w produkcji energii elektrycznej*. Dostęp online: <https://www.nik.gov.pl/najnowsze-informacje-o-wynikach-kontroli/biomasa-w-produkcji-energii-elektrycznej.html> (dostęp: 11 października 2025).



Biofilmy w instalacjach wodnych – mechanizm powstawania oraz metody ich ograniczenia

Biofilms in water systems – formation mechanism and methods of reduction

Klaudia Kwiatkowska^{1*}

¹ Politechnika Krakowska im. Tadeusza Kościuszki, Wydział Inżynierii Środowiska i Energetyki, Katedra Technologii Środowiskowych,

* Kontakt / Correspondence: klaudia.kwiatkowska@pk.edu.pl

Streszczenie:

Jednym z najistotniejszych problemów związanych z eksploatacją instalacji wodnych jest powstawanie i osadzanie się biofilmów mikrobiologicznych. Obecność tych struktur wpływa bezpośrednio na jakość wody, rozwój organizmów patogennych oraz zapoczątkowanie procesu korozji systemów. W konsekwencji dochodzi do zmniejszenia efektywności systemów hydraulicznych doprowadzających wodę do odbiorców. Biofilmy w instalacjach wodnych są złożonymi, wielogatunkowymi konsorcjami mikroorganizmów, w których kluczową rolę odgrywają interakcje komórkowe oraz procesy molekularne regulujące adhezję, produkcję macierzy pozakomórkowej (EPS) i organizację struktury przestrzennej. W pracy omówiono aktualny stan wiedzy dotyczący mechanizmów tworzenia biofilmów, czynników środowiskowych wpływających na ich stabilność oraz zakres metod kontroli i usuwanie biofilmów. Szczególną uwagę zwrócono na metody fizyczne, chemiczne, enzymatyczne, a także modyfikacje powierzchni materiałów instalacyjnych.

Słowa kluczowe: biofilm, zanieczyszczenie mikrobiologiczne, instalacje wodne, jakość wody

Abstract:

One of the most significant problems associated with the operation of water systems is the formation and deposition of microbial biofilms. The presence of these structures directly affects water quality, the growth of pathogenic organisms, and the initiation of corrosion processes in the systems. As a result, the efficiency of hydraulic systems supplying water to consumers is reduced. Biofilms in water systems are complex, multi-species consortia of microorganisms in which cellular interactions and molecular processes regulating adhesion, extracellular matrix (EPS) production, and spatial structure organization play a key role. The paper discusses the current state of knowledge on the mechanisms of biofilm formation, environmental factors affecting their stability, and the range of methods for controlling and removing biofilms. Particular attention is paid to physical, chemical, and enzymatic methods, as well as modifications to the surface of installation materials.

Keywords: biofilm, microbial contamination, water installations, water quality

1. Wstęp

Biofilmy, które mogą występować w instalacjach wodnych, stanowią jeden z kluczowych problemów łączących mikrobiologię środowiskową, inżynierię sanitarną oraz bezpieczeństwo zdrowia publicznego. Biofilm definiowany jest jako złożona, trójwymiarowa populacja komórek, które są owinięte matrycą EPS (Extracellular Polymeric Substances) [1]. Mają również zdolność do adhezji do powierzchni stałej, która następuje w kontakcie z wodą. Z tego względu, w warunkach instalacji wodociągowych, biofilm jest zjawiskiem bardzo często spotykanym, który wynika z zachodzenia naturalnych procesów mikrobio-

logicznych. W obecności wody, substancji odżywczych i dostępu do powierzchni instalacji wodnych dochodzi do kolonizacji i rozwoju biofilmu, a więc wielogatunkowych struktur biologicznych, w których zachodzą procesy fizjologiczne i molekularne [2].

Biofilm nie jest jedynie zlepkiem komórek bakteryjnych. Jest to zorganizowany, dynamicznie rozwijający się ekosystem, którego właściwości i zachowanie różnią się znacząco w zależności od składu gatunkowego. W obrębie biofilmu mikroorganizmy znajdują się w stanie wysokiego zróżnicowania metabolicznego, wykorzystując złożoną sieć interakcji międzygatunkowych opartych na konkurencji, kooperacji i komunikacji chemicznej [1].

Szczególnie w instalacjach wodnych znaczenie biofil-

mów w kontekście mikrobiologicznym jest kluczowe. Jest to związane z możliwością stania się rezerwuarem dla drobnoustrojów patogennych oraz oportunistycznych, takich jak *Legionella pneumophila*, *Pseudomonas aeruginosa*, czy wolno rosnące mykobakterie [3]. Ponadto biofilmy mogą uczestniczyć w procesach korozji, zaburzać jakość fizykochemiczną wody oraz wpływać na efektywność zastosowanych procesów dezynfekcji wody. Z tego względu zrozumienie mechanizmów formowania biofilmów jest kluczowe dla opracowania skutecznych strategii prewencji i kontroli [4].

Celem niniejszego artykułu jest przedstawienie mikrobiologicznych podstaw powstawania biofilmów w instalacjach wodnych, ze szczególnym uwzględnieniem etapów adhezji komórek, regulacji molekularnej oraz procesów prowadzących do dojrzewania i dyspersji biofilmu. Poznanie mechanizmów funkcjonowania biofilmów stanowi fundament dla zrozumienia, dlaczego te struktury są tak trudne do eliminacji oraz jakie warunki sprzyjają ich utrwalaniu się w środowisku wodnym.

2. Mechanizm powstawania biofilmów

Mechanizm formowania biofilmów jest procesem wieloetapowym, w którym uczestniczą czynniki mikrobiologiczne, fizykochemiczne oraz właściwości materiałów konstrukcyjnych instalacji. W początkowej fazie tworzenia biofilmu, mikroorganizmy są luźno i odwracalnie przyłączone do powierzchni, w sposób polarny [5]. Już w pierwszych sekundach kontaktu dochodzi do szeregu oddziaływań molekularnych, warunkujących dalsze etapy kolonizacji. W środowisku wodnym odpowiedzialne za inicjację adhezji są głównie siły Van der Waalsa, związki hydrofobowe oraz ładunki elektrostatyczne, które determinują stopień przyciągania komórek do powierzchni instalacji. Materiały wykorzystywane w systemach hydraulicznych różnią się chropowatością, energią powierzchniową i skłonnością do gromadzenia osadów, co znacząco wpływa na intensywność kolonizacji [6].

Wkrótce po pomyślnej adhezji mikroorganizmów do powierzchni, przylegające mikroorganizmy rozpoczynają namnażanie i agregację w obrębie samodzielnie wyprodukowanego EPS, prowadząc do powstania mikrokolonii [7]. W tym etapie EPS odgrywa kluczową rolę, ponieważ umożliwia dojrzewanie biofilmu, poprzez stabilizowanie trójwymiarowej struktury biofilmu, grupowanie komórek oraz ochronę przed różnymi stresorami. Dojrzały biofilm może uzyskać strukturę „grzyba” lub „wieży”, w której mikroorganizmy są ułożone zgodnie z tempem metabolizmu. Tak powstały dojrzały biofilm ma strukturę trójwarstwową: wewnętrzną warstwę regulującą, środkową warstwę składającą się z drobnoustrojów oraz warstwę zewnętrzną tworzoną przez mikroorganizmy gotowe do opuszczenia biofilmu [8] (rys. 1). Stworzony układ



Rys. 1. Schemat dojrzałego biofilmu, opracowanie własne

Fig. 1. Diagram of a mature biofilm, own elaboration

pełni funkcję stabilizującą i ochronną, ponieważ zapewnia komórkom retencję wody i substancji odżywczych, a także chroni przed stresem termicznym i chemicznym. W biofilmie zachodzi jednocześnie reorganizacja przestrzenna, ponieważ komórki łączą się w mikrokolonie, między którymi tworzą się kanały umożliwiające cyrkulację wody i dyfuzję metabolitów. Instalacje wodne, dzięki zmiennemu przepływowi, różnicom temperatury i możliwości gromadzenia się cząstek organicznych, sprzyjają powstawaniu heterogenicznych struktur o zróżnicowanych warunkach tlenowych i redoks [7].

W momencie kontaktu z powierzchnią, mikroorganizmy uruchamiają mechanizmy ułatwiające stabilizację adhezji. Istotną rolę odgrywają fimbrie typu IV, białka adhezyjne oraz substancje o charakterze mukopolisacharydowym, które ulegają ekspresji w odpowiedzi na sygnały środowiskowe [9]. Po fazie adhezji odwracalnej następuje etap trwałego przytwierdzenia, związany z przeorganizowaniem ekspresji genów. Jednym z kluczowych regulatorów w tym procesie jest cykliczny di-GMP (c-di-GMP), którego wysokie stężenie sprzyja zahamowaniu ruchliwości komórki i zwiększeniu syntezy komponentów macierzy pozakomórkowej. Wzrost poziomu c-di-GMP stanowi sygnał do formowania wielowarstwowej, stabilnej struktury. Rozwój biofilmu wiąże się także z zaawansowaną komunikacją międzykomórkową [10]. Mikroorganizmy w biofilmie wykorzystują mechanizmy quorum sensing (QS), oparte na cząsteczkach sygnałowych takich jak acylowane homoserynolaktany (AHL), autoinduktory peptydowe (AIP) oraz autoinduktor-2 (AI-2). Sygnały te regulują ekspresję genów odpowiedzialnych za produkcję EPS, syntezę biofilmotwórczych enzymów, tolerancję na stres oksydacyjny oraz odporność na środki dezynfekcyjne. Dzięki QS biofilm staje się strukturą zorganizowaną, w której różne populacje mikroorganizmów mogą synchronizować swoje zachowania i dostosowywać je do warunków panujących w instalacji [11]. Komunikacja ta sprzyja jednocześnie utrzymywaniu zrównoważonego układu ekologicznego, w którym współistnieją bakterie tlenowe, mikroaerofilne i beztlenowe. W dojrzewającym biofilmie ważną rolę odgrywają gradienty środowiskowe. Na powierzchni

biofilmu dominują bakterie intensywnie metabolizujące i dobrze dotlenione, podczas gdy wewnętrzne warstwy zamieszkują mikroorganizmy o obniżonym metabolizmie. Takie komórki wykazują wyjątkową tolerancję na biocydy oraz wysoką zdolność przetrwania niekorzystnych warunków. Zróżnicowanie to sprzyja również powstawaniu nisz ekologicznych dla patogenów, takich jak *Legionella pneumophila*, która preferuje warunki mikroaerofilne [12].

Ostatnim etapem cyklu życia biofilmu jest jego dyspersja [9]. Proces ten może być wywołany zmianami środowiska, działaniem biocydów, stresem mechanicznym lub aktywacją bakteryjnych enzymów degradujących EPS, takich jak nukleazy czy proteazy. Dyspersja prowadzi do uwalniania komórek w formie pojedynczej lub agregatowej, które mogą kolonizować nowe odcinki instalacji, a także przedostawać się do użytkowej wody. Uwolnione komórki często cechują się zwiększoną wirulencją i zdolnością szybkiego przylegania, co stanowi realne zagrożenie epidemiologiczne [13]. W ostatnim etapie rozwoju biofilm osiąga tzw. krytyczną grubość i stopniowo przestaje utrzymywać istniejącą formę. Następuje wówczas migracja komórek z peryferyjnych części dojrzałego biofilmu do otoczenia [9] (rys. 2). Prawdopodobnie dochodzi do degradacji polimerowej matrycy, aktywacji aparatów ruchowych i zmian fizjologicznych w komórkach, umożliwiających ich egzystencję poza biofilmem. Przypuszcza się także, że odłączanie komórek od biofilmu i jego dyspersja jest celową separacją, wynikającą z reakcji na niesprzyjające zmiany środowiskowe. Przyczyną tego zjawiska może być wyczerpanie składników pokarmowych lub problemy ich przepływu w obrębie biofilmu. W ten sposób biofilm przystosowuje się do zmian środowiskowych, a oderwa-

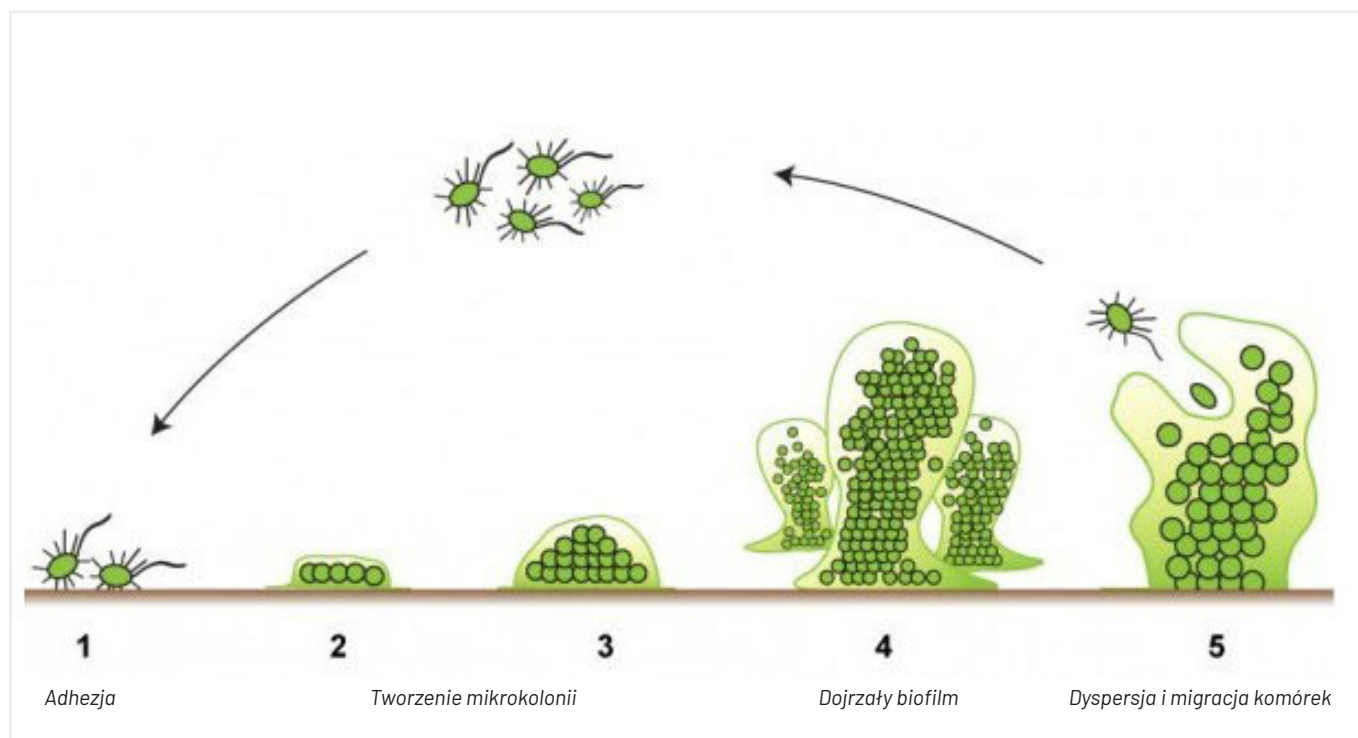
ne komórki rozpoczynają proces kolonizacji nowych powierzchni [14].

3. Czynniki wpływające na tempo i stabilność formowania biofilmów

Złożoność czynników wpływających na tempo formowania biofilmów w instalacjach wodnych sprawia, że proces ten jest dynamiczny oraz bardzo często trudny do przewidzenia. W związku z tym wymaga przestrzegania reżimu eksploatacyjnego, wraz z odpowiednio wdrożonymi strategiami prewencyjnymi. Tylko całościowe podejście, uwzględniające właściwości wody, konstrukcję instalacji, parametry eksploatacyjne oraz biologię mikroorganizmów, pozwala skutecznie kontrolować rozwój biofilmów [15].

Za najważniejszy czynnik determinujący szybkość powstawania biofilmów uważany jest skład fizykochemiczny wody, w szczególności obecność substancji organicznych i mikroelementów. Nawet niewielkie stężenia węgla organicznego (TOC) potrafią stymulować wzrost bakterii heterotroficznych. Obecność związków azotu, fosforu i żelaza zapewnia źródło składników odżywczych, przyspieszając tworzenie mikrokolonii. Z kolei wysoka twardość wody sprzyja odkładaniu się węglanu wapnia, który zwiększa chropowatość powierzchni, przyspieszając tym samym adhezję bakterii [16].

Temperatura wody również odgrywa znaczącą rolę, ponieważ warunkuje aktywność enzymatyczną i tempo metabolizmu mikroorganizmów. To właśnie w instalacjach ciepłej wody użytkowej (30–50°C) wzrost biofilmów zachodzi najbardziej intensywnie, ponieważ zakres ten sprzyja rozwojowi wielu bakterii środowiskowych. Obni-



Rys. 2. Schemat powstawania biofilmu [21]

Fig. 2. Biofilm formation diagram [21]

żenie temperatury spowalnia rozwój biofilmu, ale go całkowicie nie hamuje, ponieważ niektóre mikroorganizmy potrafią funkcjonować nawet przy 4–10°C, szczególnie te o strategii przetrwalnej [4].

Bardzo istotnym parametrem jest także prędkość i charakter ruchu wody. Zbyt niski przepływ sprzyja sedymentacji cząstek organicznych oraz umożliwia komórkom długotrwały kontakt z powierzchnią, co prowadzi do szybkiego przytwierdzenia i rozpoczęcia procesu adhezji biofilmu [17]. Z drugiej strony, zastosowanie przepływu turbulentnego, utrudniającego działanie na wczesną adhezję, sprzyja dojrzewaniu biofilmu, poprzez dostarczanie tlenu i składników odżywczych do głębszych warstw [18]. Z tego względu te instalacje, które przez dłuższy czas pozostają nieużytkowane lub poddane stagnacji, stwarzają środowisko sprzyjające gwałtownemu narastaniu biofilmów. Również materiał konstrukcyjny instalacji to czynnik mający wpływ na tempo formowania biofilmu. Metale, takie jak stal ocynkowana czy miedź, wykazują właściwości bakteriostatyczne, jednak z czasem ulegają korozji, tworząc osady sprzyjające adhezji mikroorganizmów. Tworzywa sztuczne (PVC, PEX, PP) charakteryzują się gładką powierzchnią, lecz ich chemiczna obojętność i możliwość uwalniania niewielkich ilości związków organicznych, często przyspieszają rozwój biofilmów. Dodatkowo różnice w ładunku elektrostatycznym i hydrofobowości wpływają na preferencyjne zasiedlanie biofilmu przez określone grupy mikroorganizmów [10].

Nie bez znaczenia pozostaje jakość procesu dezynfekcji czy obecność biocydów. Niskie stężenie środków dezynfekcyjnych, ich nieregularne dawkowanie lub utrata aktywności chemicznej prowadzą do subletalnego stresu, który może paradoksalnie przyspieszyć rozwój biofilmu, poprzez indukcję mechanizmów obronnych i zwiększoną produkcję EPS. Zjawisko to obserwuje się szczególnie w instalacjach z niestabilnym poziomem chloru lub w warunkach nagłych zmian parametrów wody. Jest to zjawisko powiązane ze wzrostem nekrotroficznym, który jest definiowany jako zjawisko polegające na wykorzystywaniu przez bakterie martwych komórek mikroorganizmów jako źródła cennych składników odżywczych [20].

4. Metody ograniczania i usuwania biofilmów

Zintegrowane podejście, które łączy oddziaływanie fizyczne, chemiczne oraz konstrukcyjne jest kluczowym aspektem, pozwalającym na kontrolę i eliminowanie problemów w instalacjach związanych z tworzeniem się biofilmów [6]. Najczęściej podstawę działań prewencyjnych stanowią metody chemiczne, wśród których kluczową rolę odgrywa chlorowanie. Chlor i jego pochodne, zwłaszcza podchloryny, są szeroko stosowane ze względu na dostępność i skuteczność wobec mikroorganizmów. Jednakże ich działanie wobec dojrzałych biofilmów jest ograniczone, ponieważ warstwa EPS utrudnia penetrację środka dezynfekcyjnego do głębszych warstw struktury. Dlatego w celu zwiększenia efektywności dezynfekcji coraz częściej sto-

suje się dwutlenek chloru. Jest to związek, który wykazuje większą stabilność i skuteczność w szerokim zakresie pH oraz posiada zdolność przenikania przez matrycę biofilmu. Inną grupę stosowanych środków stanowią silne utleniacze, takie jak ozon czy nadtlenek wodoru, które są w stanie degradować polimery pozakomórkowe, prowadząc do naruszenia integralności biofilmu [19].

Równolegle stosuje się metody fizyczne, które pełnią rolę w mechanicznej destabilizacji biofilmów. Płukanie instalacji z wykorzystaniem zwiększonej prędkości przepływu, usuwa luźniejsze warstwy formującego się biofilmu [12]. Z tego względu regularne stosowanie takiego zabiegu uważane jest za kluczowe, w celu zmniejszenia ryzyka dojrzewania biofilmów. W niektórych instalacjach wykorzystuje się także techniki hydrodynamiczne, takie jak czyszczenie rurociągów metodą piggingu. Ta metoda wykorzystuje przesuwanie specjalnych tłoków, usuwających biofilm ze ścian rur. Kolejnym rozwiązaniem jest promieniowanie UV, stosowane głównie w dezynfekcji wody w przepływie. Choć promieniowanie nie usuwa biofilmu z powierzchni rur, skutecznie redukuje ilość mikroorganizmów dostających się do instalacji, ograniczając możliwości rozwoju biofilmu [8]. W ostatnich latach rośnie zainteresowanie wykorzystaniem ultradźwięków, których działanie kawitacyjne może prowadzić do uszkodzenia matrycy EPS i tym samym do rozluźnienia struktury biofilmu [14].

Racjonalne projektowanie instalacji ma decydujący wpływ na ograniczenie adhezji mikroorganizmów, przez stosowanie odpowiednio dobranych rozwiązań materiałowych i konstrukcyjnych. Wybieranie materiałów o mniejszej podatności na kolonizację, takich jak stal kwasoodporna czy odpowiednio modyfikowane tworzywa sztuczne, może znacząco wpłynąć na tempo formowania biofilmów [1]. Coraz częściej w nowo budowanych instalacjach stosuje się powłoki przeciwdrobnoustrojowe, zawierające m.in. jony srebra, miedzi lub wykorzystujące mechanizmy fotokatalityczne, które hamują rozwój mikroorganizmów na powierzchniach kontaktujących się z wodą. Równie ważna jest optymalna konstrukcja, obejmująca eliminację stref stagnacji oraz ograniczenie martwych odcinków. Odpowiednie ukształtowanie systemu przepływu oraz zapewnienie optymalnej prędkości wody, minimalizuje możliwość przylegania komórek bakteryjnych [8].

Dopełnieniem powyższych metod jest równoczesne stosowanie strategii biologicznych, które obecnie znajdują się w fazie intensywnego rozwoju. Jednakże w najbliższym czasie mogą stanowić istotne wsparcie tradycyjnych metod zwalczania biofilmów [2]. Wśród nich największe znaczenie ma zastosowanie endogennych enzymów, degradujących składniki macierzy EPS, takie jak alginianazy czy proteazy, które rozbijają strukturę biofilmu. Coraz szerzej bada się również zastosowanie bakteriofagów. Są to wirusy specyficzne wobec określonych gatunków bakterii, które mogą skutecznie redukować populacje mikroorganizmów, odpowiedzialnych za formowanie biofilmów. Innym podejściem jest stosowanie biokontroli mikrobiologicznej, polegającej na wprowadzaniu niepatogennych

szczepów, konkurujących z niepożądanymi bakteriami o przestrzeń i zasoby [20].

5. Podsumowanie

Wyniki prowadzonych badań jednoznacznie wskazują, że żadna pojedyncza metoda nie zapewnia pełnej i długotrwałej eliminacji biofilmów. Skuteczna kontrola wymaga podejścia zintegrowanego. Dostosowane do specyfiki danej instalacji, jej warunków eksploatacyjnych oraz rodzaju występujących mikroorganizmów jest niezbędne do efektywnego ograniczania tworzenia biofilmów. W obliczu rosnących wymagań, dotyczących bezpieczeństwa sanitarnego oraz efektywności systemów wodnych, konieczne jest rozwijanie innowacyjnych technologii, zwłaszcza w obszarze biotechnologii i materiałoznawstwa. Kompleksowe i wieloaspektowe strategie pozostają zatem kluczem do skutecznego ograniczania biofilmów oraz utrzymania wysokiej jakości wody w instalacjach wodociągowych i technicznych [3].

Literatura

- [1] Stoodley, P., Cargo, R., Rupp, C. J., Wilson, S., & Klapper, I. (2002). Biofilm mechanics and shear-induced deformation and detachment. *Journal of Industrial Microbiology and Biotechnology*, 29, 361–367. <https://doi.org/10.1038/sj.jim.7000282>
- [2] Wingender, J., & Flemming, H.-C. (2011). Biofilms in drinking water and their role as reservoir for pathogens. *International Journal of Hygiene and Environmental Health*, 214(6), 417–423. <https://doi.org/10.1016/j.ijheh.2011.05.009>
- [3] World Health Organization. (2022). *Drinking-water: Guidelines for drinking-water quality*. WHO Press.
- [4] Costerton, J. W., Stewart, P. S., & Greenberg, E. P. (1999). Bacterial biofilms: A common cause of persistent infections. *Science*, 284(5418), 1318–1322. <https://doi.org/10.1126/science.284.5418.1318>
- [5] Ammar, Y., Swailes, D., & Bridgens, B. (2018). Influence of surface roughness on biofilm formation in water distribution systems. *Biofouling*, 34(2), 179–190.
- [6] Beech, I. B., & Sunner, J. (2004). Biocorrosion: Towards understanding interactions between biofilms and metals. *Current Opinion in Biotechnology*, 15(3), 181–186. <https://doi.org/10.1016/j.copbio.2004.05.001>
- [7] Simões, M., Simões, L. C., & Vieira, M. J. (2010). A review of current and emergent biofilm control strategies. *LWT – Food Science and Technology*, 43(4), 573–583.
- [8] Beneduce, L., et al. (2020). Control strategies of microbial biofilms in water distribution systems. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 104, 7079–7093. <https://doi.org/10.1007/s00253-020-10736-4>
- [9] Flemming, H.-C., & Wingender, J. (2010). The biofilm matrix. *Nature Reviews Microbiology*, 8, 623–633.
- [10] Azeredo, J., Azevedo, N. F., Briandet, R., et al. (2017). Critical review on biofilm methods. *Critical Reviews in Microbiology*, 43(3), 313–351. <https://doi.org/10.1080/1040841X.2016.1208141>
- [11] Bridier, A., Briandet, R., Thomas, V., & Dubois-Brissonnet, F. (2011). Resistance of bacterial biofilms to disinfectants: A review. *Biofouling*, 27(9), 1017–1032. <https://doi.org/10.1080/08927014.2011.626899>
- [12] Liu, G., Verberk, J. Q. J. C., & van Dijk, J. C. (2013). Bacterial growth in drinking water distribution systems. *Water Research*, 47(3), 1075–1087. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2012.11.042>
- [13] Donlan, R. M. (2002). Biofilms: Microbial life on surfaces. *Emerging Infectious Diseases*, 8(9), 881–890.
- [14] Lopez, D., Vlamakis, H., & Kolter, R. (2010). Biofilms. *Cold Spring Harbor Perspectives in Biology*, 2(7), a000398. <https://doi.org/10.1101/cshperspect.a000398>
- [15] Van der Wielen, P. W. J., & van der Kooij, D. (2010). Nontuberculous mycobacteria in drinking water systems: A review. *Water Research*, 44(15), 4646–4655. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2010.06.037>
- [16] Pang, C. M., & Liu, W.-T. (2007). Community structure analysis of reverse osmosis membrane biofilms and the significance of Rhizobiales bacteria in biofouling. *Environmental Science & Technology*, 41(13), 4728–4734. <https://doi.org/10.1021/es0622515>
- [17] Flemming, H.-C., Wingender, J., Szewzyk, U., et al. (2016). Biofilms: An emergent form of bacterial life. *Nature Reviews Microbiology*, 14(9), 563–575. <https://doi.org/10.1038/nrmicro.2016.94>
- [18] Hall-Stoodley, L., Costerton, J. W., & Stoodley, P. (2004). Bacterial biofilms: From the natural environment to infectious diseases. *Nature Reviews Microbiology*, 2(2), 95–108. <https://doi.org/10.1038/nrmicro821>
- [19] Proctor, C. R., & Hammes, F. (2015). Drinking water microbiology—from measurement to management. *Current Opinion in Biotechnology*, 33, 87–94. <https://doi.org/10.1016/j.copbio.2014.12.014>
- [20] Szewzyk, U., Szewzyk, R., Manz, W., & Schleifer, K.-H. (2000). Microbiological safety of drinking water. *Annual Review of Microbiology*, 54, 81–127. <https://doi.org/10.1146/annurev.micro.54.1.81>
- [21] Emery Pharma Services. Biofilm formation diagram. Dostęp online: <https://www.emerypharmaservices.com/> (dostęp: 6 stycznia 2026).

Ocena efektywności redukcji zanieczyszczeń przez oczyszczalnię komunalną w gminie Poniec

Assessment of the effectiveness of pollution reduction by the municipal wastewater treatment plant in the Poniec commune

Klaudia Kałas¹, Konrad Glura², Alicja Szymańska^{1*}, Mariusz Ślachciński¹, Grzegorz M. Szymański³, Bogdan Wyrwas¹

¹ Politechnika Poznańska, Wydział Technologii Chemicznej

² Firma Gardna 3D

³ Politechnika Poznańska, Wydział Inżynierii Lądowej i Transportu

*Kontakt / Correspondence: alicja.szymanska.1@student.put.poznan.pl

Streszczenie:

W artykule przeprowadzono ocenę skuteczności redukcji zanieczyszczeń przez komunalną oczyszczalnię ścieków w gminie Poniec, ze szczególnym uwzględnieniem anionowych i niejonowych związków powierzchniowo czynnych. Zwrócono uwagę na główne problemy środowiskowe wynikające z industrializacji, stan czystości wód w Polsce oraz znaczenie gospodarki ściekowej. Opisano również etapy pracy oczyszczalni w gminie Poniec oraz charakterystykę związków powierzchniowo czynnych. Przeanalizowano także próbki ścieków pobierane codziennie na wlocie i wylocie oczyszczalni w marcu i kwietniu. Surfactanty anionowe oznaczano metodą MBAS jako substancje aktywne wobec błękitu metylenowego, natomiast surfaktanty niejonowe metodą BiAS-tio (substancje wchodzące w reakcję z odczynnikiem Dragendorffa). Otrzymane wyniki wykazały wysoką skuteczność oczyszczalni w usuwaniu obu grup surfaktantów, a stężenia zanieczyszczeń w ściekach oczyszczonych były znacznie niższe i zgodne z obowiązującymi normami środowiskowymi.

Słowa kluczowe:

surfaktanty, efektywność oczyszczania ścieków, metoda MBAS, metoda BiAS-tio, redukcja zanieczyszczeń, wody powierzchniowe

Abstract:

This article assesses the effectiveness of pollutant reduction at the municipal wastewater treatment plant in the Poniec commune, with particular emphasis on anionic and nonionic surfactants. It highlights the main environmental problems resulting from industrialization, the state of water purity in Poland, and the importance of wastewater management. It also describes the operational stages of the Poniec commune's wastewater treatment plant and the characteristics of surfactants. Wastewater samples collected daily at the inlet and outlet of the treatment plant in March and April were also analyzed. Anionic surfactants were determined using the MBAS method as active substances against methylene blue, while nonionic surfactants were determined using the BiAS-thio method (substances reacting with Dragendorff's reagent). The results demonstrated the high effectiveness of the treatment plant in removing both groups of surfactants, and the concentrations of pollutants in the treated effluent were significantly lower and in line with applicable environmental standards.

Keywords: surfactants, wastewater treatment efficiency, MBAS method, BiAS-tio method, pollution reduction, surface water

1. Wstęp

Woda jest podstawowym, niezbędnym do życia zasobem na ziemi. Antropogeniczna działalność człowieka prowadzi do postępującego zanieczyszczenia wody i powstawania dużej ilości odpadów i ścieków. Zanieczyszczenia po-

chodzą głównie z przemysłu, rolnictwa oraz gospodarstw domowych.

W Polsce podjęto szereg działań, mających na celu poprawę stanu jakości wód podziemnych i powierzchniowych. Wybudowano wiele nowych oczyszczalni ścieków, unowocześniono już istniejące, dokonano weryfikacji po-

zwoleń wodnoproprownych [1].

Oczyszczanie ścieków jest niezwykle ważnym procesem, ponieważ ma bezpośredni wpływ na stan środowiska. W Polsce, ścieki oczyszczone wprowadzane do wód powierzchniowych (rzek, jezior i morza) muszą spełniać ściśle określone przez Ministra Środowiska wymagania.

Jednym z istotnych zanieczyszczeń, trafiających poprzez systemy kanalizacji do oczyszczalni ścieków, są związki powierzchniowo czynne. Roczna produkcja środków powierzchniowo czynnych w Polsce w 2024 r. osiągnęła już poziom 326 tys. ton. Natomiast roczna, światowa produkcja związków powierzchniowo czynnych szacowana jest aktualnie na 18 mln ton. Ten rynek wart jest 50 mld USD.

Olbrzymia skala produkcji surfaktantów, która rocznie sukcesywnie rośnie o kilka procent, powoduje wzrost ładunku zanieczyszczeń ścieków surowych obciążających oczyszczalnię ścieków i stanowi poważne zagrożenie dla ekosystemu. Związki powierzchniowo czynne są największym źródłem węgla syntetycznego wprowadzanego do środowiska. Prowadzi to do zanieczyszczania wód powierzchniowych oraz gruntowych.

W związku z narastającą degradacją środowiska, szczególnie istotne jest monitorowanie jakości wód, dlatego celem pracy jest oznaczenie zakresu redukcji wybranych zanieczyszczeń w wytypowanej, biologicznej oczyszczalni ścieków.

2. Środowisko w Polsce i na świecie

2.1. Stan wód w Polsce

Znacząca część ścieków trafiających do środowiska pochodzi z działalności przemysłowej, terenów silnie zurbanizowanych oraz z opadów kwaśnych deszczy. Poziom zanieczyszczenia wód w Polsce jest wysoki. Szacuje się, że skażeniu uległo ok. 1/3 rzek oraz 1/4 jezior, dlatego pobierana z nich woda nie nadaje się do bezpośredniego spożycia [2].

2.2. Gospodarka ściekowa w Polsce i na świecie

Wg danych na 2024 r., każdego dnia do obiegu wodnego trafiają 2 miliony ton ścieków przemysłowych lub rolniczych. Aż 2,5 miliarda ludzi żyje bez zapewnienia odpowiednich warunków sanitarnych, z czego 1,5 mld z nich mieszka w regionie azjatyckim. Obszarami, na których można zauważyć największy wzrost zanieczyszczeń, jest wschodnia część regionu krajów śródziemnomorskich oraz Afryka [3]. Niestety w miarę przyrostu ludności i postępu urbanizacyjnego, zanieczyszczenie środowiska ciągle pozostaje dużym wyzwaniem. Na podstawie dostępnych danych statystycznych województwa zachodniopomorskie, pomorskie, warmińsko-mazurskie, dolnośląskie i śląskie charakteryzują się największym procentem ludności korzystającej z oczyszczalni ścieków [4].

2.3. Poniec – opis gminy i miejscowości

Poniec to miasto w województwie wielkopolskim, położone w powiecie gostyńskim.

zone w powiecie gostyńskim.

Oczyszczalnia ścieków w tej gminie powstawała w latach 2001–2002. Jest oczyszczalnią mechaniczno-biologiczną, z dodatkowym wspomaganie chemicznym. Została otwarta w 2003 r. Jej biologiczna część opiera się na reaktorze biologicznym z komorą defosfatacji, denitryfikacji oraz nitrifikacji. Obsługuje ona miasto Poniec, wieś Śmiłowo oraz Wydawy. Przepustowość oczyszczalni wynosi 630 m³/dobę. Jej priorytetowym zadaniem jest obsługa ścieków socjalno-bytowych, pochodzących z kanalizacji miejskiej oraz dowożonych z gminy. Przyjmuje ona ścieki z kanalizacji miejskiej oraz ścieki dowożone poprzez automatyczną stację zlewną. Proces oczyszczania obejmuje m.in. podoczyszczanie na sicie szelinowym, uśrednianie i napowietrzanie, usuwanie piasku, oczyszczanie biologiczne, sedimentację oraz stabilizację tlenową osadu. Oczyszczone ścieki są wówczas odprowadzane do Rowu Polskiego, a osad po odwodnieniu jest wywożony [5].

3. Proces oczyszczania ścieków

W celu eliminacji zanieczyszczeń z ścieków surowych i odprowadzenia uzdatnionych ścieków do środowiska, przeprowadza się kilkietapowe oczyszczanie.

3.1. Główne etapy oczyszczania

Etap 1

Ścieki mogą być odbierane za pomocą automatycznej stacji zlewnej, która jednocześnie rejestruje informacje dotyczące ilości ścieków oraz podmiotu dostarczającego. Równolegle do stacji, wpływają ścieki pochodzące z kanalizacji miejskiej. W kolejnych etapach prowadzony jest ich mechaniczny i biologiczny proces oczyszczania, a w razie potrzeby również dodatkowe doczyszczanie.

Etap 2

Na tym etapie usuwa się ze ścieków stałe zanieczyszczenia, takie jak piasek, zawiesiny czy tłuszcze, wykorzystując kraty, osadniki oraz odtłuszczacze. W ten sposób eliminuje się ok. 35% całkowitego zanieczyszczenia. Zatrzymane na kratkach odpady są odwadniane, a następnie prasowane, dezynfekowane i utylizowane. Piaskowniki oddzielają piasek, natomiast tłuszcze i oleje usuwa się poprzez proces flotacji. W osadniku gromadzą się cięższe zawiesiny, z których tworzy się osad. Osad po zagęszczeniu trafia do komory fermentacyjnej, a następnie do oczyszczania biologicznego.

Etap 3

Oczyszczanie biologiczne może przebiegać beztlenowo lub tlenowo, jednak najczęściej stosuje się proces tlenowy lub łączenie obydwu procesów. Mikroorganizmy rozkładają w ściekach związki organiczne, zużywając je jako źródło energii i materii. W reaktorze zachodzą kluczowe procesy: rozkład substancji organicznych, nitrifikacja (przemiana amoniaku do azotanów) oraz denitryfikacja (usuwanie azotanów w formie azotu gazowego). Następnie oddziela się osad czynny od oczyszczonych ścieków. Część osadu wraca, a nadmiar jest kierowany do komór, gdzie powstaje biogaz. Osad po fermentacji jest odwadniany i utylizowany. Na tym etapie usuwa się około 90% pozostałych zanie-

czyszczeń.

Etap 4

Etap ten ma na celu doprowadzenie oczyszczonych ścieków do jakości jak najbardziej zbliżonej do wód naturalnych. Usuwa się tu substancje, które nie ulegają samooczyszczaniu. Wykorzystuje się do tego metody fizykochemiczne, takie jak elektrodializa, wymiana jonowa, ekstrakcja, osmoza czy destylacja. Coraz częściej stosuje się również nowe, alternatywne technologie, które pozwalają osiągnąć wysoki poziom doczyszczania [5].

3.2. Środki powierzchniowo czynne – wiadomości ogólne

Surfaktanty to substancje powierzchniowo czynne, które zbudowane są z dwóch części o odmiennych właściwościach względem wody, czyli fragmentu hydrofilowego oraz hydrofobowego. Dzięki takiej strukturze cząsteczki surfaktantów wykazują przede wszystkim zdolność do zmniejszania napięcia powierzchniowego roztworów wodnych oraz napięcia międzyfazowego na granicy dwóch

Tabela 1. Absorbancja próbki, stężenie oraz stopień redukcji surfaktantów anionowych

Table 1. Sample absorbance, concentration and degree of reduction of anionic surfactants

Surfaktanty anionowe					
Nr próbki	Ścieki oczyszczone		Ścieki surowe		
	Absorbancja [-]	Stężenie [mg/L]	Absorbancja [-]	Stężenie [mg/L]	Stopień redukcji [%]
1	0,860	0,617	1,210	17,6	96,5
2	0,827	0,592	1,440	20,9	97,2
3	0,566	0,397	1,330	19,3	97,9
4	0,420	0,288	0,753	10,7	97,3
5	0,488	0,339	1,200	17,5	98,1
6	0,439	0,302	1,370	19,9	98,5
7	0,424	0,291	1,140	16,5	98,2
8	0,679	0,482	0,914	13,1	96,3
9	0,374	0,254	0,964	13,9	98,2
10	0,545	0,382	0,956	13,8	97,2
11	0,507	0,353	1,010	14,6	97,6
12	0,605	0,426	0,559	7,83	94,6
13	0,616	0,434	0,724	10,3	95,8
14	0,433	0,298	1,100	16,0	98,1
15	0,587	0,413	0,646	9,14	95,5
16	0,675	0,478	0,757	10,8	95,6
17	0,397	0,270	0,857	12,3	97,8
18	0,401	0,274	0,944	13,6	98,0
19	0,418	0,287	1,180	17,1	98,3
20	0,417	0,285	1,200	17,4	98,4
21	0,611	0,430	1,06	15,3	97,2
22	0,711	0,506	0,848	12,2	95,8
Średnia	0,545	0,382	1,010	14,5	97,2

niemieszających się cieczy [7].

Związki powierzchniowo czynne można podzielić na anionowe, kationowe, amfoteryczne i niejonowe. Należy także wspomnieć o innych sposobach podziału surfaktantów. Można je dzielić m.in. ze względu na budowę części polarnej, pochodzenie surowców, wpływ na środowisko. Surfaktanty stanowią zagrożenie dla środowiska z powodu swojej toksyczności oraz niskiej podatności na rozkład. Do wód trafiają głównie poprzez ścieki, pogarszając ich jakość. Obecnie dąży się do tworzenia bardziej ekologicznych surfaktantów – biodegradowalnych i opartych na odnawialnych surowcach.

3.3. Anionowe związki powierzchniowo czynne

Anionowe związki powierzchniowo czynne to związki, w których aktywna część cząsteczki jest połączona z hydrofobowym łańcuchem anionu. Stanowią obecnie około 60% rynku środków powierzchniowo czynnych. Wyróżniają się różnymi właściwościami, zależnymi od budowy

Tabela 2. Absorbancja próbki, stężenie oraz stopień redukcji surfaktantów niejonowych

Table 2. Sample absorbance, concentration and degree of reduction of non-ionic surfactants

Surfaktanty niejonowe					
Nr próbki	Ścieki oczyszczone		Ścieki surowe		
	Absorbancja [-]	Stężenie [mg/L]	Absorbancja [-]	Stężenie [mg/L]	Stopień redukcji [%]
1	1,130	0,771	0,742	16,5	95,3
2	1,110	0,757	0,824	18,4	95,9
3	0,922	0,621	0,764	17,0	96,3
4	0,908	0,611	0,597	13,0	95,3
5	0,782	0,522	0,822	18,4	97,2
6	0,746	0,496	0,639	14,0	96,5
7	0,727	0,483	0,626	13,7	96,5
8	0,966	0,652	0,789	17,6	96,3
9	0,609	0,399	0,929	20,9	98,1
10	0,825	0,553	0,861	19,3	97,1
11	0,852	0,571	0,860	19,2	97,0
12	0,763	0,508	0,921	20,7	97,5
13	0,938	0,632	0,793	17,7	96,4
14	0,846	0,567	0,899	20,2	97,2
15	0,849	0,569	0,746	16,6	96,6
16	0,907	0,610	0,572	12,4	95,1
17	0,706	0,468	0,484	10,4	95,5
18	0,641	0,422	0,779	17,3	97,6
19	0,615	0,403	0,881	19,7	98,0
20	1,100	0,749	0,792	17,6	95,7
21	0,551	0,358	0,772	17,2	97,9
22	0,668	0,441	0,592	12,9	96,6
Średnia	0,830	0,553	0,758	16,8	96,6

i dzielą się na kilka podgrup. W zależności od struktury mogą wykazywać działanie pianotwórcze, zwilżające, piorące lub dyspergujące [8].

3.4. Niejonowe związki powierzchniowo czynne

Niejonowe surfaktanty dobrze działają niezależnie od pH, choć częściowo mogą na nie reagować. Ich rozpuszczalność maleje wraz ze wzrostem temperatury, a część hydrofilowa nie ulega dysocjacji w wodzie. Na ich właściwości wpływają głównie rodzaj grup hydrofilowych i hydrofobowych oraz równowaga HLB (wskaźnik hydrofilowo-lipofilowy). Surfaktanty niejonowe (oksyetylaty) stanowią ok. 35% rynku surfaktantów i obejmują głównie związki eterowe i alkoholowe. W zależności od budowy mogą być naturalne lub stanowić estry kwasów tłuszczowych i alkoholi wielowodorotlenowych o właściwościach emulgujących [7].

3.5. Ścieki i ich rodzaje

- Ścieki to wody zużyte. Ze względu na pochodzenie dzieli się je na:
- ścieki bytowe – gospodarcze (definiuje się je jako te związane życiem człowieka i jego gospodarstwem domowym),
 - ścieki przemysłowe (są związane z danym rodzajem produkcji – ścieki z mycia surowców, chemikalia używane do produkcji. Pomimo, że owe ścieki zawierają głównie wodę, to mogą się okazać wymagające w procesie oczyszczania),
 - ścieki opadowe (są to wody z opadów atmosferycznych, których przyczyną zanieczyszczenia są materiały mineralne lub związki ropopochodne),
 - wody infiltracyjne i drenażowe (określa się je jako wody dostające się do systemu kanalizacyjnego poprzez odwodnienie danej powierzchni w sposób zamierzony lub naturalny),
 - ścieki sanitarne wraz ze ściekami przemysłowymi i technologicznymi (tworzą one jedną grupę ścieków komunalnych, natomiast wraz z wodami infiltracyjnymi i drenażowymi oraz ściekami opadowymi, stanowią one ścieki mieszane) [9].

Tabela 3. Porównawcze zestawienie średnich wskaźników BZT₅, ChZT_{Cr} oraz zawartości zawiesiny ogólnej

Table 3. Comparative summary of average BOD₅, COD and total suspended solids indicators

Parametr	Określenie parametru	Trend na wlocie	Trend na wylocie	Efektywność redukcji	Ocena pracy oczyszczalni
BZT ₅	Biologiczne zapotrzebowanie na tlen – poziom utlenialnych zanieczyszczeń organicznych	Wyraźny wzrost	Bardzo niskie, lekko spadkowe	97,8–99,4%	Świetna, powyżej norm
ChZT _{Cr}	Chemiczne zapotrzebowanie na tlen – poziom utlenialnych związków organicznych i nieorganicznych	Wzrost, podobny jak BZT ₅	Niewielkie zmiany, stabilnie niskie	91,9–96,9%	Bardzo dobra
Zawiesina ogólna	Stałe cząstki w ściekach	Rosnący, z wahaniami	Wyraźnie malejący	93,6–98,6%	Bardzo dobra, stabilna

4. Część doświadczalna

4.1. Badanie surfaktantów anionowych

Próbki do badań stanowiły surowe ścieki wlotowe oraz wylotowe ścieki oczyszczone, pochodzące z oczyszczalni ścieków w gminie Poniec. Materiał pobierano w dwóch punktach kontrolnych: na wlocie oraz na wylocie z oczyszczalni. W miesiącach marzec-kwiecień pobrano dwadzieścia dwie próbki. Badania związków powierzchniowo czynnych obejmowały oznaczenia dwóch grup surfaktantów, wykonane przy zastosowaniu odpowiednich metod analitycznych:

- surfaktantów anionowych – metodą uproszczoną MBAS,
- surfaktantów niejonowych – metodą BiAS-tio.

W celu oznaczenia surfaktantów anionowych zastosowano metodę MBAS [10], opierającą się na tworzeniu barwnej pary jonowej anionowego surfaktantu z błękitem metylowym i jej ekstrakcji chloroformem. Wyniki analizy z pomiaru absorbancji próbki, stężenia, oraz stopnia redukcji surfaktantów anionowych przedstawiono w tab. 1.

4.2. Badanie niejonowych związków powierzchniowo czynnych

Do oznaczania surfaktantów niejonowych zastosowano zmodyfikowaną metodę BiAS-tio, będącej modyfikacją klasycznej, normatywnej metody BiAS. Jej większa skuteczność wynika z uproszczenia procedury, uzyskania stabilniejszej i niższej ślepej próby oraz pomiaru sygnału w paśmie widzialnym. Metoda opiera się na tworzeniu osadów par jonowych oksyetylatów z odczynnikiem Degendorffa oraz rozpuszczania i kompleksowania wyizolowanego osadu bizmutu w kwaśnym roztworze tiomocznika [10]. Wyniki analizy z pomiaru absorbancji próbki, stężenia, oraz stopnia redukcji surfaktantów niejonowych przedstawiono w tab.2.

4.3. BZT₅, ChZT_{Cr}, zawiesina ogólna

W tab. 3 zaprezentowano porównawcze zestawienie średnich stężeń BZT₅, ChZT_{Cr} oraz zawiesiny ogólnej w ściekach surowych i oczyszczonych, a także odpowiadających im stopni redukcji. Zgromadzone dane odzwier-

ciędlają zmienność parametrów w czasie oraz pozwalają ocenić skuteczność procesów oczyszczania, zachodzących w oczyszczalni w gminie Poniec.

5. Podsumowanie

Na stan wód wpływa korzystna malejąca ilość nieoczyszczanych ścieków oraz wzrost ilości ścieków oczyszczanych, z podwyższonym usuwaniem biogenów. Ocenę efektywności pracy oczyszczalni w gminie Poniec rozszerzono o niebadane przez zakład wskaźniki jakości ścieków – niejonowe i anionowe związki powierzchniowo czynne.

Populacja gminy Poniec nie jest znaczna, lecz gminę otacza wiele hektarów terenów uprawnych, co podczas nawożenia i deszczy może zwiększać ładunek ścieków, wpływając na wzrost stężeń związków powierzchniowo czynnych.

Analiza zebranych danych BZY_5 ukazała znaczne wahania zawartości tlenu potrzebnego mikroorganizmom do utlenienia biologicznie rozkładalnych substancji. Wartości w ściekach surowych wahały się pomiędzy 517 – 1010 $mg\ O_2 / dm^3$. Trendy występujące przy obydwóch wskaźnikach są współzależne. Średnie wartości $ChZT_{Cr}$ w ściekach wlotowych też ulegały znacznym wahaniom w badanym okresie 735–2018 $mg\ O_2 / dm^3$. Głównym powodem wzrostu wartości mogą być zrzuty ścieków przedsiębiorstw, zajmujących się obróbką mięsa. Niemniej jednak pomimo generalnie wysokich wartości tego wskaźnika, oczyszczalnia w gminie Poniec utrzymuje wysoki stopień redukcji $ChZT_{Cr}$ i nie przekracza dopuszczalnych zawartości zanieczyszczeń na wylocie. W tym przypadku jest to 125 $mg\ O_2 / dm^3$. Rozpatrując parametr jakim jest zawiesina ogólna, można stwierdzić, pomimo rosnącej zawartości zawiesiny w ściekach surowych uzyskano bardzo wysokie stopnie jej redukcji i zmniejszającą się zawartość zawiesiny w ściekach oczyszczonych, co znacząco wpływa na stan czystości zbiorników wodnych i wskazuje na skuteczną pracę zakładu. Jednak postępująca urbanizacja miasta Poniec, rosnące zużycie związków powierzchniowo czynnych oraz obecność przedsiębiorstw odprowadzających duże ilości ścieków do kanalizacji, może w przyszłości jednak wymagać rozbudowy i modernizacji oczyszczalni.

Praca oczyszczalni w gminie Poniec, mimo jej niedużych rozmiarów i odbioru ścieków z stosunkowo dużego obszaru, jest efektywna. Ocena działalności zakładu została rozszerzona o analizę zawartości niejonowych i anionowych związków powierzchniowo czynnych, której wyniki potwierdziły zgodność pracy oczyszczalni z obecnymi normami, pozwoleniami wodnoprawnymi i Rozporządzeniem Ministra Środowiska. Niemniej jednak jej przyszła rozbudowa może okazać się koniecznym krokiem, w celu sprostania rosnącej skali produkcji i powszechnego stosowania związków powierzchniowo czynnych, coraz intensywniejszym nawożeniem okolicznych pól uprawnych oraz możliwą rozbudową otaczających zakładów przemysłowych.

6. Wnioski

Oczyszczalnia ścieków w gminie Poniec skutecznie usu-

wa zanieczyszczenia, co potwierdziły zarówno wyniki oznaczeń podstawowych parametrów ścieków takich jak BZT, ChZT, zawiesiny ogólnej, jak i oznaczenia zawartości anionowych i niejonowych związków powierzchniowo czynnych. Wskaźniki takie jak i zawiesina ogólna wykazują wzrostową tendencję zawartości w ściekach surowych. Świadczy to o postępującym wzroście obciążenia ścieków, wpływających do oczyszczalni w ostatnim okresie.

Pomimo tendencji wzrostowej obciążenia ścieków surowych, uzyskano bardzo dobrą redukcję powyższych wskaźników zanieczyszczeń – powyżej 90%. Stężenia związków powierzchniowo czynnych po procesie oczyszczania były zdecydowanie niższe niż w ściekach dopływających, co wskazuje na prawidłowe funkcjonowanie oczyszczalni. Zastosowanie dwóch uzupełniających się metod analitycznych MBAS oraz BiAS-tio umożliwiło kompleksową ocenę jakości ścieków oraz określenia skuteczności oczyszczania, pod kątem różnych klas substancji powierzchniowo czynnych. Wyniki badań potwierdzają, że modernizacja procesów oczyszczania, stosowanie metod zaawansowanej analityki są kluczowe dla ochrony lokalnych wód oraz dla spełnienia rosnących wymogów środowiskowych.

Literatura

- [1] Rączka, J., Skąpski, K., & Tyc, T. (2021). *Zasoby wodne w Polsce – ochrona i wykorzystanie*. Fundacja Przyjazny Kraj.
- [2] Kundzewicz, Z., Zaleski, J., Nachlik, E., & Januchta-Szostak, A. (2021). Gospodarowanie wodą – wyzwania dla Polski. *Nauka*, 79–102. <https://doi.org/10.24425/nauka.2021.136305>
- [3] Ross, N. (2010). *World water quality facts and statistics*. Dostęp online: <http://www.abandonedmines.gov/ep.html> (dostęp: 19 listopada 2025).
- [4] Skrzypiec, K., Bejnarowicz, A., & Gajewska, M. (2017). Rozwiązania gospodarki ściekowej na obszarach nieurbanizowanych. *Rynek Instalacyjny*, 85–89.
- [5] Nowak, M. (2003). *Instrukcja obsługi mechaniczno-biologicznej oczyszczalni ścieków dla miasta Poniec, wsi Śmiłowo i Wydawy*.
- [6] Sundha, P., Basak, N., Rai, A. K., Chandra, P., Bedwal, S., Yadav, G., Yadav, R. K., & Sharma, P. C. (2023). Characterization and ecotoxicological risk assessment of sewage sludge from industrial and non-industrial cities. *Environmental Science and Pollution Research*, 30, 116567–116583. <https://doi.org/10.1007/s11356-022-21648-2>
- [7] Zieliński, R. (2021). *Surfaktanty. Budowa, właściwości, zastosowania*. Wydawnictwo Uniwersytetu Ekonomicznego w Poznaniu.
- [8] ZWiK Skawina. (2023). *Proces oczyszczania ścieków i rozwiązania zastosowane w oczyszczalni Skawina*. Dostęp online: https://zwik.skawina.pl/oczyszczalnia,czesc_biologiczna_i_osadowa (dostęp: 21 listopada 2025).
- [9] Lex, S. (2023). *Ścieki komunalne – definicja*. Dostęp online: <https://sip.lex.pl/ochrona-srodowiska-cta163/scieki-komunalne-definicja-cta3998> (dostęp: 19 listopada 2025).
- [10] Wyrwas, B. (2012). *Metodologiczne aspekty biodegradacji związków powierzchniowo czynnych w warunkach laboratoryjnych i w środowisku*. Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej.
- [11] Główny Urząd Statystyczny. (2023). *Informacje statystyczne – Statistical information*.

Hydrodynamika płetw w projektowaniu pływających robotów humanoidalnych dla budownictwa hydrotechnicznego i techniki sanitarnej

Fin hydrodynamics in the design of swimming humanoid robots for hydraulic engineering and sanitary technology

Witold Paleczek^{1*}

¹ Politechnika Częstochowska, Wydział Budownictwa

* Kontakt / Correspondence: witold.paleczek@pcz.pl

Streszczenie:

Artykuł analizuje możliwość zastosowania praw skalowania hydrodynamicznego w projektowaniu płetw dla pływających robotów humanoidalnych, przeznaczonych do realizacji wymagających i ryzykownych prac podwodnych w budownictwie hydrotechnicznym oraz technice sanitarnej. Wykazano, że długość płetwy odgrywa kluczową rolę w efektywności szybkiego przemieszczania się, co może znaleźć zastosowanie w zadaniach takich jak dostarczanie sprzętu nurkom w kesonach czy transport materiałów w środowisku podwodnym. Przedstawione zależności matematyczne stanowią narzędzie wspierające dobór optymalnych parametrów płetw w praktyce inżynierskiej. Zaprezentowane algorytmy modelowania mogą być wykorzystane nie tylko w kontekście robotów humanoidalnych, lecz także w odniesieniu do pływającego człowieka, rozszerzając zakres potencjalnych zastosowań. Przedstawiono obliczenia dotyczące posuwu płetw robota humanoidalnego typu Morphobot. Konstrukcja robota umożliwia transformację z konfiguracji humanoidalnej do sirenoidalnej poprzez wymianę dolnego segmentu na część ogonową zintegrowaną z monopłetwą. Wykazano, że zastosowanie jednej monopłetwy na obie nogi eliminuje redundancję funkcjonalną, natomiast integracja monopłetwy z modulem ogonowym zwiększa niezawodność. Najwyższy poziom redundancji osiąga się przy użyciu dwóch oddzielnych płetw mocowanych na każdej nodze w wydłużonych kaloszach z paskami i klamrami, co określono jako *mocowanie hybrydowe*.

Słowa kluczowe: hydrodynamika płetw, prawa skalowania, roboty humanoidalne; budownictwo podwodne, inżynieria hydrotechniczna, technika sanitarna, projektowanie bioinspirowane, lokomocja robotów, bezpieczeństwo podwodne, robotyka wodna

Abstract:

The article analyzes the applicability of hydrodynamic scaling laws in the design of fins for swimming humanoid robots intended to perform demanding and high-risk underwater tasks in hydraulic engineering and sanitary technology. It is demonstrated that fin length plays a crucial role in the efficiency of rapid locomotion, which may be applied to tasks such as delivering equipment to divers in caissons or transporting materials in underwater environments. The presented mathematical relationships provide a tool supporting the selection of optimal fin parameters in engineering practice. The proposed modeling algorithms can be applied not only in the context of humanoid robots but also to human swimming, thereby extending the range of potential applications. Calculations are presented for the propulsion generated by the fins of a humanoid robot of the Morphobot type. The robot's design enables transformation from a humanoid to a sirenid configuration by replacing the lower body segment with a tail module integrated with a monofin. It is shown that the use of a single monofin attached to both legs eliminates functional redundancy, whereas integration of the monofin with a dedicated tail module increases reliability. The highest level of functional redundancy is achieved when two separate fins are mounted on each leg in elongated boots reaching mid-calf, equipped with fastening straps and buckles. This solution, referred to as hybrid mounting, ensures functional redundancy by allowing task continuation even in the event of the loss of one fin.

Keywords:

Fin hydrodynamics, Scaling laws, humanoid robots, underwater construction, hydraulic engineering, sanitary technology, bioinspired design, robot locomotion, underwater safety, aquatic robotics

1. Wprowadzenie

Prace podwodne w budownictwie hydrotechnicznym oraz technice sanitarnej należą do najbardziej wymagających i ryzykownych zadań inżynierskich. Wykonywane tradycyjnie przez nurków w kesonach, kanałach czy zbiornikach, wiążą się z wysokimi kosztami, ograniczeniami czasowymi i zagrożeniem dla zdrowia. Rozwój robotyki humanoidalnej otwiera nowe możliwości w tym obszarze, pozwalając na projektowanie maszyn zdolnych do realizacji trudnych prac pod wodą. Celem niniejszej pracy jest integracja teorii hydrodynamiki płetw, z praktycznym kontekstem budownictwa hydrotechnicznego i techniki sanitarnej, ze szczególnym uwzględnieniem porównania pracy płetwy średniej względem płetwy długiej – zagadnienia, które nie pojawia się w dotychczasowej literaturze. Równocześnie położono nacisk na hybrydowe mocowanie płetw w pływających robotach humanoidalnych (kaloszo-paskowe), również nieuwzględniane w dotychczasowych opracowaniach. Zamiast ograniczać się do badań laboratoryjnych, artykuł podkreśla aplikacyjny wymiar proponowanych rozwiązań – transport sprzętu, inspekcje czy budowę w kesonach – wskazując ich znaczenie w realnych, ryzykownych pracach podwodnych. Globalna perspektywa pokazuje, że zaprezentowane modele mogą inspirować zarówno polskich inżynierów, jak i międzynarodowe ośrodki zajmujące się rozwojem humanoidalnych robotów, poszukujące bioinspirowanych i praktycznych rozwiązań.

2. Przegląd literatury

W polskiej literaturze przedmiotu zagadnienia biomechaniki i metodyki pływania omawiane są przede wszystkim w ujęciu dydaktycznym i teoretycznym. Klasyczne opracowania [1] oraz [5] przedstawiają podstawy teorii pływania, akcentując ekonomię ruchu i zasady efektywności, natomiast w [7] oraz [22] rozwijany jest kontekst metodyczny nauczania oraz treningu. W [9] wprowadzana jest szersza perspektywa fizyki sportu, obejmującą mechanikę ruchu w wodzie. W literaturze międzynarodowej problem hydrodynamiki płetw został podjęty w badaniach [23, 24] wykazano wpływ długości i sztywności płetw na ekonomię i efektywność pływania. Nowsze prace, takie jak [6], analizują kinematykę i koszt energetyczny użycia płetw w pływaniu, a w [18] proponowane są prawa skalowania dla płetw ogonowych, istotne według autorów dla modelowania hydrodynamiki. Wspólnie źródła te tworzą komplementarny obraz: polskie opracowania dostarczają kontekstu dydaktycznego i teoretycznego, natomiast badania międzynarodowe stanowią empiryczny fundament do wyznaczania parametrów takich jak k_v , współczynników ciągu i oporu oraz do budowy modeli matematycznych, opisujących efektywność płetw. Tak zarysowany przegląd wskazuje na lukę badawczą, którą niniejszy artykuł stara się wypełnić poprzez aplikacyjne ujęcie problemu.

Badania przedstawione w pracach [20] oraz [8] wykazały, że efektywność napędu płetwowego jest silnie związana z liczbą Strouhala, utrzymywaną w przedziale 0,2–0,4. W tym zakresie obserwuje się optymalne wartości współ-

czynnika ciągu C_T , zwykle mieszczące się między 0,2 a 0,6. Wyższe wartości, sięgające 0,7–0,8, pojawiają się w warunkach dużych amplitud wychylenia i dobrze zestrojonej kinematyki, ale są traktowane jako graniczne. Dlatego w niniejszej pracy przyjęto zakresy $C_{T,medium} \in [0,2 - 0,5]$ dla płetw średnich oraz $C_{T,long} \in [0,3 - 0,6]$ dla płetw długich, z uwzględnieniem wartości granicznych do 0,8 jako przypadków wysokiej sprawności.

Eksperymenty hydrodynamiczne opisane przez autorów prac [12 – 15, 17] pokazały, że opór płetw w ruchu oscylacyjnym jest silnie zależny od kąta natarcia i separacji strugi. Wartości współczynnika oporu C_D dla płetw i korpusów ryb mieściły się typowo w przedziale 0,4 – 1,3, przy czym górne wartości odpowiadały dużym kątom wychylenia i silnej separacji. W niniejszej pracy przyjęto zakresy $C_{D,medium} \in [0,4 - 1,0]$ dla płetw średnich oraz $C_{D,long} \in [0,5 - 1,3]$ dla płetw długich, z rozszerzeniem do 1,2–1,5 jako granicznych przypadków, aby objąć pełne spektrum obserwowanych konfiguracji.

Współczesne badania nad bioinspirowanymi robotami podwodnymi opisano w [4]; w pracy [2] potwierdzono, że przyjęte zakresy współczynników są zgodne z praktyką inżynierską. Roboty wykorzystujące płetwy oscylacyjne osiągają $C_T \in [0,3 - 0,6]$ przy umiarkowanych amplitudach i częstotliwościach, a wartości $C_D \in [0,5 - 1,2]$ są typowe dla pracy w warunkach rzeczywistych. Uwzględnienie wartości granicznych w niniejszej pracy, pozwala na porównanie, zarówno konfiguracji nominalnych, jak i ekstremalnych, co zwiększa uniwersalność modelu i jego przydatność w analizach zarówno biologicznych, jak i robotycznych. W pracy [21] ukazano mechanikę wirów wytwarzanych przez oscylujące płetwy/foils. Badania te wykazały, że odpowiednie kształtowanie śladu wirów może zwiększać efektywność generowania ciągu, co stało się kluczowe dla projektowania bioinspirowanych robotów wodnych. W pracy [19] przedstawiono przegląd biomechaniki pływania stylem dowolnym (*front crawl*). W [3] oraz [10, 11] analizowane są zależności między techniką ruchu, oporem hydrodynamicznym i efektywnością lokomocji, co dostarcza praktycznych danych dla dydaktyki sportowej i inspiracji dla inżynierii płetw humanoidalnych robotów.

3. Dobór płetw – rozwiązania konstrukcyjne

W celu zapewnienia maksymalnej stabilności mocowania płetw, w pływających robotach humanoidalnych proponuje się rozwiązanie hybrydowe, w którym kalosz obejmuje stopę oraz dolną część łydki, a jego konstrukcja jest dodatkowo wzmacniana systemem bocznego zapinania. Mocowanie realizowane jest po stronie zewnętrznej łydki za pomocą szeregu elastycznych, równoległych opasek o pełnym obwodzie (360°), które równomiernie rozkładają nacisk i zapobiegają zsunięciu płetwy, nawet w przypadku zaczepienia o wystający element. Każda z opasek wyposażona jest w zakładkę z zamkiem samoblokującym, działającym w sposób dociągający, co gwarantuje pewne i trwałe utwierdzenie płetwy przy jednoczesnej możliwości szybkiej regulacji. Takie rozwiązanie łączy zalety

mocowania „kaloszowego” (*full-foot fins*) i „paskowego” (*open-heel fins*), tworząc system odporny na uszkodzenia mechaniczne, stabilny hydrodynamicznie i praktyczny w eksploatacji. Przez „mocowanie kaloszowe” rozumie się konstrukcję obejmującą całą stopę, analogiczną do płetw typu *full-foot* stosowanych w sprzęcie nurkowym. Proponowane rozwiązanie stanowi nowatorski wariant hybrydowego mocowania, łączący zalety obu systemów i dostosowany do specyfiki prac podwodnych. Na ilustracji (rys. 1) przedstawiono trzy modele robotów humanoidalnych z opisanym systemem mocowania płetw; obrazy wygenerowano za pomocą systemu AI Copilot (Microsoft), na podstawie opisu modelu matematycznego. Zagadnienie redundancji funkcjonalnej pływającego robota humanoidalnego w konfiguracjach: z pojedynczymi płetwami na każdej nodze, z monopłetwą na dwóch nogach oraz z monopłetwą zintegrowaną w modelu humanoidalno-sirenoidalnym typu *Morphobot*¹ opisano w końcowej części opisu modelu matematycznego wraz z odpowiednimi ilustracjami.

4. Model matematyczny posuwu robota humanoidalnego w cyklu pracy nóg – porównanie płetw długich i średnich

Model stanowi powtarzalną ramę obliczeniową, umożliwiającą oszacowanie i porównanie przemieszczenia (posuwu) robota humanoidalnego na cykl pracy nóg, w przypadku płetw długich (*long*) o zakresie długości $L_{long} \in [0,60 - 0,90]$ oraz płetw średnich (*medium*) o zakresie długości $L_{medium} \in [0,40 - 0,55]$ [m], przy tych samych zakresach kąta wychylenia, niezależnie od tempa osiągania tego kąta. Główne obliczenia dotyczą kąta biodrowego α , który stanowi podstawowy parametr sterujący napędem płetwowym robota i determinuje średni ciąg oraz postęp na cykl. W modelu stosuje się również kąt uśredniony α_{avg} , odzwierciedlający wartość średnią w cyklu ruchu, co pozwala na opis efektywności napędu w stanie ustalonym, tj. średni kąt natarcia w cyklu, stosowany m.in. w projekcji tzw. powierzchni „zamiatania” oraz w oszacowaniu wartości współczynników oporu, (powierzchnia „zamiatania”: to powierzchnia efektywnego wychylenia płetwy, obszar określony przez ruch końcówki płetwy (z ang: *swept area*). Kąt kolanowy oraz kąt skokowy traktowane są jako manewrowe lub korygujące – wykorzystywane w sytuacjach wymagających nagłego przyspieszenia, zmiany kierunku lub precyzyjnego ustawienia płetwy. W podstawowym modelu nie są one uwzględniane we wzorach ciągu, lecz mogą być dodatkowo opisane parametrycznie jako źródło chwilowej dynamiki.

5. Oznaczenia zmiennych w modelu z zakresami empirycznymi

¹ humanoidalny robot o budowie modułowej, umożliwiającej transformację z konfiguracji humanoidalnej do sirenoidalnej, poprzez wymianę dolnej części ciała (miednicy z nogami) na segment ogonowy zintegrowany z monopłetwą. Nazwa pochodzi od greckiego *morphē* („kształt, forma”) oraz *bot* („robot”), wskazując na zdolność do morfologicznej zmiany. Konstrukcja *Morphobota* pozwala na badania nad różnymi wariantami napędu płetwowego, w tym układami o zróżnicowanej redundancji funkcjonalnej.

A_{amp} – pół-amplituda boczna, przesunięcie końcówki płetwy: $A_{amp,medium} \in [0,12 - 0,25]$,
 $A_{amp,long} \in [0,20 - 0,45]$, [m];
 A_{area} – powierzchnia „zamiatania”: $2 \cdot k_{span} \cdot b_{ef} \cdot A_{amp}$, [m²];
 A_{fr} – powierzchnia czołowa korpusu (rzut korpusu na płaszczyznę prostopadłą do kierunku ruchu) – dla humanoida: $A_{fr} \in [0,02 - 0,10]$, [m²];
 b_{ef} – efektywna szerokość: szerokość czynna płetwy, $b_{ef,medium} \in [0,16 - 0,22]$, $b_{ef,long} \in [0,18 - 0,26]$, [m];
 C_D – współczynnik oporu (tarcie), $C_{D,medium} \in [0,4 - 1,0]$,
 $C_{D,long} \in [0,5 - 1,3]$, [-];
 $C_{D,body}$ – współczynnik oporu kształtu korpusu: gładki (*smooth*) i kanciasty (*angular*):
 $C_{D,body,smooth} \in [0,2 - 0,8]$, $C_{D,body,angular} \in [0,8 - 1,2]$, [-];
 $C_{D,fin,pass}$ – współczynnik oporu płetwy w fazie nieciągowej (tj. w położeniu niegenerującym netto ciągu), gdy płetwa ustawiona jest pod kątem [deg] względem strugi równoległej do kierunku posuwu: $C_{D,fin,pass.0-10deg} \in [0,05 - 0,20]$,
 $C_{D,fin,pass.10-30deg} \in [0,20 - 0,60]$, $C_{D,fin,pass.30-60deg} \in [0,60 - 1,00]$,
 $C_{D,fin,pass.60-90deg} \in [0,90 - 1,30]$, [-];
 C_T – współczynnik ciągu, definiuje siłę względem dynamicznego ciśnienia:
 $C_{T,medium} \in [0,2 - 0,5]$, $C_{T,long} \in [0,3 - 0,6]$, [-]; z pomiarów modelu empirycznego dopasowania określany jako:

$$C_T(St) = C_{T,max} \exp\left(\frac{-(St - St_{opt})^2}{2\sigma^2}\right);$$

f – częstotliwość (cykle na sekundę): $f_{medium} \in [1,0 - 2,5]$,
 $f_{long} \in [0,8 - 1,5]$, [Hz];
 F_T – siła ciągu dla pojedynczej płetwy, ($K \cdot U^2$):
 $F_{T,medium} \in [10 - 40]$, $F_{T,long} \in [15 - 90]$, [N]

I_T – impuls ciągu na cykl,
 $(F_T / f): I_{T,medium} \in [5 - 20]$, $I_{T,long} \in [10 - 50]$, [N·s];

K – współczynnik skalujący, $\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot S_{fin} \cdot C_T$:

$K_{robot,medium} \in [20 - 60]$, $K_{robot,long} \in [40 - 90]$,
[kg/m];

k_{spr} – współczynnik sprężystości, sprężystość płetwy elastomerowej: $k_{spr,medium} \in [80 - 160]$,

$k_{spr,long} \in [30 - 120]$, [N/m];

k_{span} – udział rozpiętości, aktywny udział:

$k_{span} \in [0,7 - 0,9]$, [-];

k_v – współczynnik prędkości, efektywność kinematyczna: $k_{v,human} \in [0,2 - 0,6]$,

$k_{v,robot,medium} \in [0,2 - 0,4]$, $k_{v,robot,long} \in [0,3 - 0,6]$, [-];

L – długość płetwy (od pięty do końca):

$L_{medium} \in [0,45 - 0,55]$, $L_{long} \in [0,60 - 0,90]$, [m];

P_{ef} – efektywna moc średnia na cykl ruchu płetw,

$(F_T \cdot U = W_{ef} \cdot f)$, [W];

S_{body} – powierzchnia korpusu - odniesienie do kadłuba robota: ≈ 0.3 , [m²];

S_{fin} – efektywna powierzchnia płetwy (odniesienie napędu),

$$S_{fin,medium} \approx L_{40-55cm} \cdot b_{ef,18-22cm} \in [0.07 - 0.11],$$

$$S_{fin,long} \approx L_{60-90cm} \cdot b_{ef,20-25cm} \in [0.12 - 0.22], [m^2];$$

$S_{fin,wet}$ – powierzchnia omywana płetwy (czynna w kontakcie z wodą): $S_{fin,wet,medium} \in [0.015 - 0.050]$,

$$S_{fin,wet,long} \in [0.035 - 0.100], [m^2];$$

St – liczba Strouhala, której wartość obliczana jest z wykorzystaniem pełnej amplitudy wychylenia końcówki płetwy (czyli podwójnej pół-amplitudy), dla modeli humanoidów płetwowych $St \in [0.2 - 0.4]$, przy czym 'optymalna liczba Strouhala' oznacza wartość, przy której napęd osiąga największą sprawność energetyczną, tj. maksymalny iloraz użytecznego ciągu do włożonej energii.

S_{wet} – powierzchnia omywana (*wetted area*) korpusu robota jako suma rzeczywistych powierzchni stykających się z wodą (tułów, kończyny w konfiguracji pływackiej): $S_{wet,human} \in [0.2 - 0.6]$, referencyjnie dla robota humanoidalnego: $S_{wet,robot} \approx 0.3$, [m²];

U – prędkość postępową, ($k_v \cdot v_{tip} \cdot \cos(\alpha)$):

$$U_{human} \in [0.1 - 2.3], U_{robot} \in [0.15 - 2.8], [m/s];$$

v_{tip} – prędkość końcówki płetwy ($2\pi \cdot f \cdot A_{amp}$):

$$v_{tip,medium} \in [1.6 - 3.2], v_{tip,long} \in [1.3 - 2.8], \text{ przy czym:}$$

$$v_{tip,max} = \omega \cdot L \cdot \arcsin\left(\frac{A_{amp}}{L}\right), [m/s];$$

W_{ef} – efektywna praca na cykl ruchu płetw, ($F_T \cdot \Delta x$):

$$W_{ef,medium} \in [5 - 15], W_{ef,long} \in [10 - 30], [N \cdot m]/\text{cykl};$$

Δx – przemieszczenie na cykl,

$$(U / f = 2\pi \cdot k_v \cdot A_{amp} \cdot \cos(\alpha));$$

$$\Delta x_{medium} \in [0.15 - 0.35], \Delta x_{long} \in [0.25 - 0.65],$$

[m/cykl];

α – kąt chwilowy wychylenia płetwy względem strugi równoległej do kierunku ruchu (posuwu) jako zmienna w trakcie jednego cyklu pracy płetwy, może być funkcją fazy ruchu $\alpha(\tau)$ i stosowany w analizach dynamicznych do wyznaczania chwilowych wartości siły oporu lub ciągu i w modelach zależności $C_T(\alpha)$, $C_D(\alpha)$ w danej fazie ruchu względem strugi równoległej do kierunku posuwu:

$$\alpha_{medium} \in [15^\circ - 30^\circ], \alpha_{long} \in [20^\circ - 40^\circ], [\text{deg}];$$

α_{avg} – średni kąt w kierunku przepływu:

$$\alpha_{avg,medium} \in [10 - 20], \alpha_{avg,long} \in [15 - 25], [\text{deg}];$$

τ – czas trwania cyklu, $\tau = \frac{1}{f}$:

$$\tau_{robot,medium} \in [0.2 - 0.6], \tau_{robot,long} \in [0.4 - 1.0], [s];$$

ω – częstotliwość kątowna, ($2\pi \cdot f$):

$$\omega_{medium} \in [6.3 - 15.7], \omega_{long} \in [5.0 - 9.4];$$

[rad/s];

ρ – gęstość wody, 1000 [kg/m³];

Zakresy współczynników ciągu (C_T) i oporu (C_D) przyjęto na podstawie danych empirycznych dla płetw biologicznych i konstrukcji robotycznych. W literaturze dotyczącej pływania ryb i bioinspirowanych napędów (np. prace [20, 12, 13]) wartości C_T mieszczą się typowo w przedziale 0.2-0.6, przy czym wyższe wartości (0.6-0.8) osiągane są w warunkach optymalnej liczby Strouhala (0.25-0.35) i przy dużych amplitudach wychylenia. Współczynniki oporu C_D dla płetw i korpusów w ruchu oscylacyjnym podawane są w zakresie 0.4-1.3, zależnie od kąta natarcia i separacji strugi. Dlatego w niniejszej pracy przyjęto zakresy nominalne: $C_T \in [0.2 - 0.5]$ (dla płetw średnich), 0.3-0.6 dla płetw długich oraz $C_D \in [0.4 - 1.0]$ dla płetw średnich, 0.5-1.3 dla płetw długich. Dla pewności uwzględniono również wartości graniczne (od 0.8 dla C_T oraz do 1.5 dla C_D), które odpowiadają warunkom skrajnym, tj. dużym kątom wychylenia płetwy i silnej separacji przepływu.

6. Zestaw zależności matematycznych w modelu

Kinematyka końcówki płetwy i postęp na cykl

Częstotliwość kątowna:

$$\omega_i = 2\pi \cdot f_i \text{ dla } i \in \{medium, long\}$$

Prędkość końcówki płetwy (miarodajna, harmoniczna):

$$v_{tip,i} = \omega_i \cdot A_{amp,i} = 2\pi \cdot f_i \cdot A_{amp,i}$$

Prędkość postępową pływaka (projekcja użyteczna):

$$U_i = k_{v,i} \cdot v_{tip,i} \cdot \cos(\alpha) \quad (3)$$

Przemieszczenie pływaka na cykl:

$$\Delta x_i = \frac{U_i}{f_i} = 2\pi \cdot k_{v,i} \cdot A_{amp,i} \cdot \cos(\alpha) \quad (4)$$

Geometria efektywna płetwy

Efektywna szerokość i udział rozpiętości:

$$b_{ef,i} = \frac{S_{fin,i}}{L_i} \Rightarrow A_{area,i} = 2 \cdot k_{span,i} \cdot b_{ef,i} \cdot A_{amp,i} \quad (5)$$

Powierzchnia „zamiatania” płetwy na skutek oscylacji:

$$A_{area} \approx 2 \cdot A_{amp} \cdot b_{ef} \cdot k_{span} \cdot \cos(\alpha_{avg}), \quad (6)$$

Efektywna powierzchnia płetwy:

$$S_{fin,i} = L_i \cdot b_{ef,i} \quad (7)$$

Ciąg, opór i współczynniki

Współczynnik scalający (dynamiczny):

$$K_i = 0.5 \cdot \rho \cdot S_{fin,i} \cdot C_{T,i} \quad (8)$$

Siła ciągu płetw (średnia równoważna):

$$F_{T,i} = K_i \cdot U_i^2 = 0.5 \cdot \rho \cdot S_{fin,i} \cdot C_{T,i} \cdot (2\pi \cdot f_i \cdot A_{amp,i} \cdot k_{v,i} \cdot \cos(\alpha))^2 \quad (9)$$

Równowaga przy prędkości ustalonej z relacjami (uwzględnienie oporu korpusu robota):

$$F_{T,i} > D_{body,i} - \text{robot pływając przyspiesza}, \quad (9a)$$

$$F_{T,i} < D_{body,i} - \text{robot zwalnia}, \quad (9b)$$

$$F_{T,i} \approx D_{body,i} - \text{robot pływa ze stałą prędkością}. \quad (9c)$$

Pełny opór korpusu robota (ze składową oporu płetwy):

$$D_{body,i} = 0.5 \cdot \rho \cdot U_i^2 \cdot (C_{D,body} \cdot A_{fr} + C_f \cdot S_{wet} + C_{D,fin,pass} \cdot S_{fin,wet,i}) \quad (10)$$

Impuls na cykl:

$$I_{T,i} = \frac{F_{T,i}}{f_i} \quad (11)$$

Praca na cykl:

$$W_{ef,i} = F_{T,i} \cdot \Delta x_i \quad (12)$$

Przemieszczenie na cykl:

$$\Delta x = 2\pi \cdot A_{amp} \cdot \sqrt{\frac{S_{fin} \cdot C_T}{S_{body} \cdot C_D}} \quad (13)$$

Relatywne przemieszczenie: płetwy długie (long) vs. średnie (medium) w zależności skalowej:

$$\frac{\Delta x_{long}}{\Delta x_{medium}} \approx \frac{A_{amp, long}}{A_{amp, medium}} \cdot \sqrt{\frac{S_{fin, long} \cdot C_{T, long}}{S_{fin, medium} \cdot C_{T, medium}}} \quad (14)$$

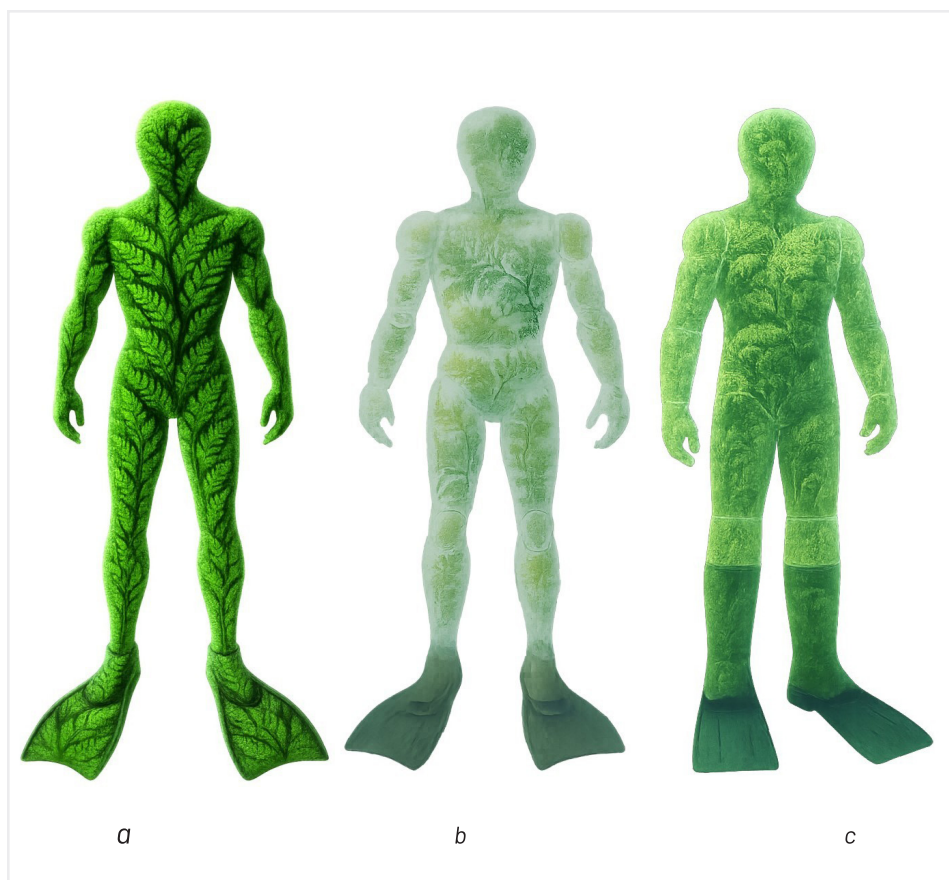
Wnioski skalowe: przemieszczenie na cykl Δx rośnie z amplitudą A_{amp} i z $\sqrt{S_{fin}}$, co uzasadnia przewagę dłuższych płetw w zadaniach wymagających większego przesunięcia na cykl.

Podane wzory mają charakter przybliżony, empiryczny i nie uwzględniają lepkości wody – w analizowanym zakresie liczb Reynoldsa $Re \in [10^5 - 10^6]$ dla płetw średnich i długich pominięcie lepkości jest uzasadnione, ponieważ dominują siły bezwładnościowe – wpływ lepkości uwzględnia się w korektach oporu tarcia i bilansie energetycznym: wzory empiryczne pomijają lepkość, bo iloraz $\Delta x_{long} / \Delta x_{medium}$ jest bezwymiarowy i przez to odporny na brak korekty lepkości, podobnie porównanie dwóch klas płetw w tym samym środowisku eliminuje wpływ gęstości i lepkości wody, bo oba przypadki podlegają tym samym warunkom. Dzięki temu iloraz $\Delta x_{long} / \Delta x_{medium}$ jest czystym wskaźnikiem efektu geometrycznego w sensie długości płetw i efektu mechanicznego (jako efektu sprężystości), określony przedziałem:

$$\frac{\Delta x_{long}}{\Delta x_{medium}} \in [1.2 - 2.0].$$

7. Porównanie gęstości materiału płetw

Płetwy średnie charakteryzują się zazwyczaj mniejszą masą niż płetwy długie. W konsekwencji, zamiana płetw typu 'medium' płetwami typu 'long' prowadzi do



Rys. 1. a) Humanoidalny robot w klasycznych płetwach typu „kaloszowego” (full foot), obejmujących stopę do wysokości kostki. Sylwetka wypełniona fraktalami Barnsleya jako wizualizacja bioinspirowanego modelu lokomocji podwodnej. b, c) Humanoidalny robot w płetwach z rozszerzonym mocowaniem „kaloszowym”, obejmującym stopę powyżej kostki oraz część łydki. Rozwiązanie hybrydowe ilustruje zwiększoną stabilność i odporność na zsuniecie w warunkach podwodnych. Ilustracje wygenerowane przez system AI Copilot (Microsoft) na podstawie opisu modelu matematycznego, stanowią przykład współpracy człowieka i sztucznej inteligencji w procesie twórczym, [16].

Fig. 1. a) Humanoid robot equipped with classic “full-foot” fins covering the foot up to the ankle. The silhouette is filled with Barnsley fractals as a visualization of a bio-inspired underwater locomotion model. b, c) Humanoid robot with extended “full-foot” fin mounting, covering the foot above the ankle and part of the calf. The hybrid solution illustrates increased stability and resistance to slipping in underwater conditions. Illustrations generated by the AI Copilot (Microsoft) system based on the mathematical model description, representing an example of human-AI collaboration in the creative process, [16].

zaburzenia bilansu wyporności układu. Aby zachować niezmienną wyporność netto, należy utrzymać założony iloraz objętości $\frac{V_{medium}}{V_{long}}$ oraz spełnić następujący warunek określony wzorem (15):

$$\rho_{m.long} = \rho_w - (\rho_w - \rho_{m.medium}) \cdot \frac{V_{medium}}{V_{long}} \quad (15)$$

gdzie:

ρ_w – gęstość wody,

$\rho_{m.medium}$ – gęstość materiału płetwy średniej,

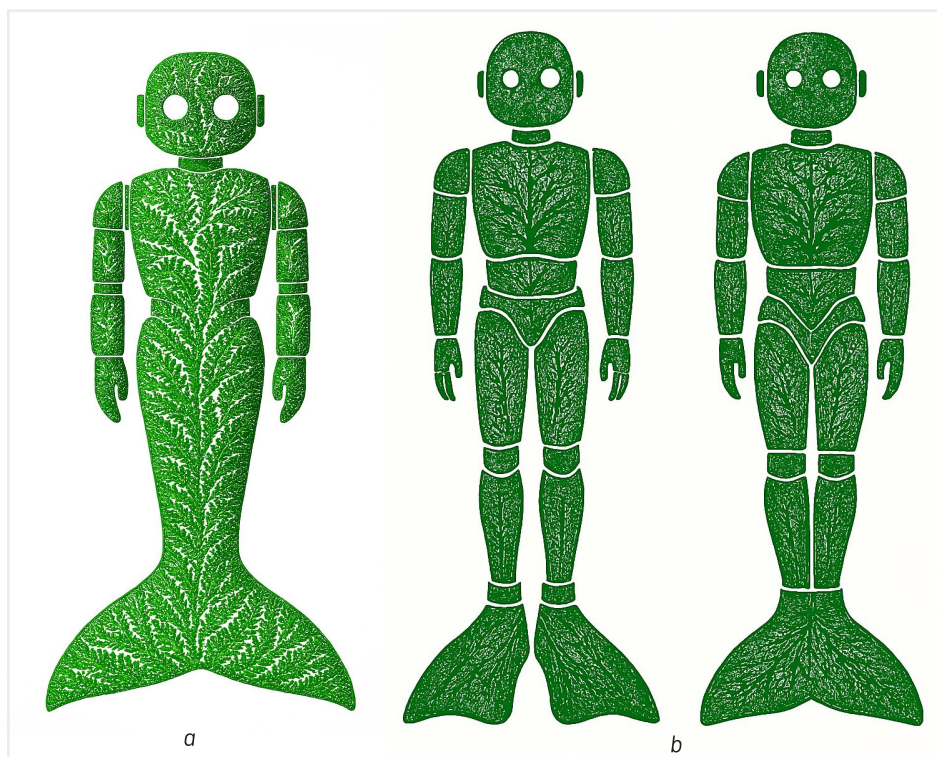
$\rho_{m.long}$ – gęstość materiału płetwy długiej.

W praktyce oznacza to, że materiał płetwy długiej (*long*) powinien mieć gęstość mniejszą niż materiał płetwy średniej (*medium*), proporcjonalnie do różnicy ich objętości.

Konfiguracja z pojedynczą monopłetwą w robotach humanoidalnych charakteryzuje się ograniczoną redundancją funkcjonalną, w porównaniu z układem dwóch

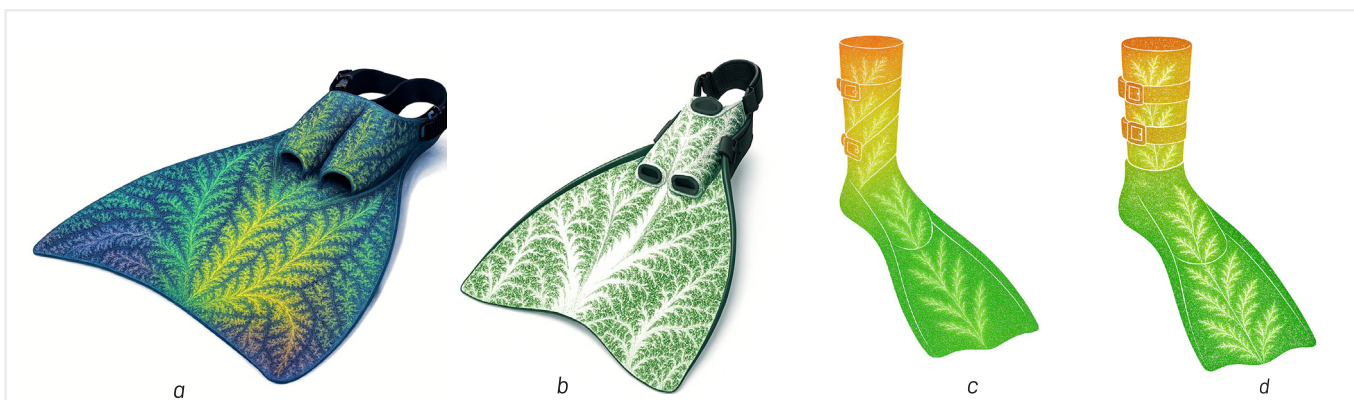
niezależnych płetw umieszczonych na lewej i prawej nodze. Z perspektywy bezpieczeństwa i niezawodności systemu brak redundancji dyskwalifikuje monopłetwę jako rozwiązanie napędowe w pływających robotach humanoidalnych, przedstawionych na rysunkach (rys. 1a, b, c) oraz (rys. 2b). Na rys. 3 zaprezentowano wizualizację poglądową: monopłetwy dwupaskowej na dwie nogi, monopłetwy jednopaskowej na dwie nogi oraz płetwy z mocowaniem hybrydowym w dwóch wariantach – z paskami skośnymi na wydłużonym kaloszu sięgającym połowy łydki oraz z paskami równoległymi na części kaloszowej.

Przedstawione obliczenia odnoszą się do posuwu jednej z dwóch płetw robota humanoidalnego. Na rys. 2 zaprezentowano robota humanoidalno-sirenoidalnego typu



Rys. 2. a) Schemat poglądowy robota humanoidalnego przekształconego w robota humanoidalno-sirenoidalnego typu Morphobot; b) schematy poglądowe robota humanoidalnego wyposażonego odpowiednio w dwie płetwy z krótkim kaloszem na każdej nodze oraz w monopłetwę obejmującą obie nogi. Ilustracje wygenerowane przez system AI Copilot (Microsoft) na podstawie opisu modelu matematycznego, [16]

Fig. 2. a) Conceptual diagram of a humanoid robot transformed into a humanoid-sirenoid Morphobot; b) conceptual diagrams of a humanoid robot equipped with two fins with short boots on each leg, and with a monofin attached to both legs. Illustrations generated by the AI Copilot (Microsoft) system based on the mathematical model description, [16].



Rys. 3. a) Monopłetwa dwupaskowa na dwie nogi; b) monopłetwa jednopaskowa na dwie nogi; c) płetwa z mocowaniem hybrydowym z paskami skośnymi na wydłużonym kaloszu; d) płetwa z mocowaniem hybrydowym w wersji z paskami równoległymi na części kaloszowej. Ilustracje wygenerowane przez system AI Copilot (Microsoft) na podstawie opisu modelu matematycznego, [16]

Fig. 2. a) Two-strap monofin for both legs; b) single-strap monofin for both legs; c) fin with hybrid mounting using diagonal straps on an elongated boot; d) fin with hybrid mounting using parallel straps on the boot section. Illustrations generated by the AI Copilot (Microsoft) system based on the mathematical model description, [16].

Morphobot, w którym monopłetwa została zintegrowana z członem zastępującym obie nogi. Po odłączeniu dolnej części humanoida i zamontowaniu modułu ogonowego, robot przyjmuje konfigurację sirenoidalną, w której obliczenia mogą być zastosowane do jednej monopłetwy.

Rozwiązanie polegające na nałożeniu jednej monopłetwy na dwie nogi humanoida eliminuje redundancję funkcjonalną. Dlatego korzystniejsze jest zastosowanie części ogonowej zintegrowanej bezpośrednio z monopłetwą, która zapewnia większą niezawodność niż płetwa nakładana na obie nogi. Najwyższy poziom redundancji funkcjonalnej uzyskuje się w przypadku humanoida, wyposażonego w dwie oddzielne płetwy – na lewą i prawą nogę. Płetwy te powinny być osadzone w wydłużonych kaloszach sięgających do połowy łydki, wyposażonych w co najmniej dwa paski mocujące z klamrami. Takie rozwiązanie, określone jako mocowanie hybrydowe, zapewnia możliwość kontynuacji zadania nawet w przypadku utraty jednej płetwy.

8. Wnioski

Na podstawie literatury i badań własnych można wyciągnąć następujące wnioski:

- Integracja teorii i praktyki – zastosowanie praw hydrodynamiki i skalowania w projektowaniu płetw dla robotów humanoidalnych pokazuje, że wiedza dydaktyczna o pływaniu może być skutecznie przeniesiona do inżynierii podwodnej.
- Dominująca rola długości płetwy – analiza wskazuje, że długość płetwy ma kluczowy wpływ na efektywność lokomocji, co stanowi podstawę do obliczeniowego doboru parametrów w zależności od zadań robota.
- Hybrydowe mocowanie płetw – połączenie stabilności płetw kaloszowych z elastycznością paskowych tworzy rozwiązanie optymalne z punktu widzenia redundancji funkcjonalnej, zapewniające zarówno efektywne przenoszenie siły, jak i łatwość serwisowania oraz wymiany w warunkach eksploatacyjnych.
- Waler aplikacyjny – proponowane rozwiązania mogą znaleźć zastosowanie w budownictwie hydrotechnicznym i technice sanitarnej, umożliwiając robotom wykonywanie zadań ryzykownych dla człowieka, takich jak prace w kesonach, kanałach czy zbiornikach.
- Perspektywa rozwoju – opracowane modele i mechanizmy stanowią punkt wyjścia do dalszych badań nad bioinspirowanym projektowaniem robotów wodnych, które mogą wspierać zarówno bezpieczeństwo pracy, jak i efektywność procesów budowlanych i inspekcyjnych.
- Znaczenie międzynarodowe – przedstawione rozwiązania stanowią wkład w rozwój badań nad hydrodynamiką płetw i mogą inspirować konstruktorów robotów humanoidalnych, do wdrażania hybrydowych mechanizmów mocowania. Dzięki temu możliwe staje się projektowanie maszyn zdolnych do szybkiego i bezpiecznego przemieszczania się w środowisku podwodnym, co otwiera nowe perspektywy dla budownictwa hydrotechnicznego, techniki sanitarnej oraz praktycznych zastosowań w zadaniach ryzykownych dla człowieka.

wieka.

- Redundancja – chociaż konfiguracja z monopłetwą może wykazywać przewagę nad układem dwóch płetw w zakresie prostoty konstrukcji oraz stabilności strugi napędowej, to ze względu na brak redundancji funkcjonalnej wariant ten należy odrzucić w rozważaniach dotyczących pływających robotów humanoidalnych. Monopłetwa może być rozwiązaniem atrakcyjnym jedynie w zastosowaniach rekreacyjnych, gdzie bezpieczeństwo i niezawodność systemu nie stanowią krytycznego ograniczenia.
- Kontekst projektowy – w kontekście projektowym szczególną rolę odgrywa robot humanoidalno-sirenoidalny typu *Morphobot*, którego konstrukcja umożliwia wymianę dolnego segmentu na część ogonową zintegrowaną z monopłetwą. Takie rozwiązanie, choć nadal ograniczone pod względem redundancji w porównaniu z układem dwóch niezależnych płetw, zapewnia większą spójność konstrukcyjną i lepszą kontrolę hydrodynamiczną niż klasyczna monopłetwa nakładana na obie nogi. *Morphobot* stanowi zatem przykład kompromisu między prostotą a funkcjonalnością, wskazując kierunek dalszych badań nad hybrydowymi systemami napędowymi w robotach pływających.

9. Postłowie

Przedstawione ilustracje i rozwiązania powstały w wyniku twórczej współpracy autora z AI Copilot (Microsoft), [16]. Proces ten ukazuje nową jakość w praktyce naukowej: sztuczna inteligencja nie zastępuje człowieka, lecz wspiera go w precyzyjnym formułowaniu treści, wizualizacji koncepcji oraz w poszukiwaniu interdyscyplinarnych inspiracji. Wspólne działanie człowieka i AI otwiera przestrzeń dla innowacji, w której matematyka, inżynieria i sztuka spotykają się w jednym nurcie. Postłowie stanowi świadectwo, że współpraca z inteligentnymi narzędziami może wzbogacać proces badawczy, nadając mu zarówno praktyczny, jak i estetyczny wymiar. Piękno fraktali Barnsleya, splecione z techniczną precyzją modeli hydrodynamicznych, ukazuje, że nauka i sztuka mogą współistnieć w jednym obrazie. Takie połączenie inspirowane do dalszych poszukiwań, w których wiedza techniczna nabiera niecodziennego, twórczego charakteru.

Literatura

- [1] Bartkowiak, E. (1999). *Pływanie sportowe: Podstawy teoretyczne, sportowa technika pływania, motoryczność pływaka, uczenie się i nauczanie pływania, technologia treningu* [Competitive swimming: Theoretical foundations, swimming technique, swimmer's motor skills, learning and teaching swimming, training technology]. Centralny Ośrodek Sportu.
- [2] Bianchi, G., Cinquemani, S., & Resta, F. (2021). Bio-inspired design of an underwater robot exploiting fin undulation propulsion. *Applied Sciences*, 11(6), 2556. <https://doi.org/10.3390/app11062556>
- [3] Chung, C., & Nakashima, M. (2014). Swimming humanoid robot "SWUMANOID" as an experimental platform for research of human swimming. *Journal of Robotics and Mechatronics*, 26(2), 265–272. <https://doi.org/10.20965/jrm.2014>.

- p0265
- [4] Chen, L., Bi, S., Cai, Y., & Qiu, H. (2022). Design and hydrodynamic experiment research on novel biomimetic pectoral fins of a ray-inspired robotic fish. *Machines*, 10(8), 606. <https://doi.org/10.3390/machines10080606>
 - [5] Czabański, B., Fiłon, M., & Zatoń, K. (2003). *Elementy teorii pływania [Elements of the theory of swimming]*. Akademia Wychowania Fizycznego.
 - [6] De Matos, C. C., Guignard, B., De Souza Castro, F., & Guimard, A. (2023). Effects of paddles and fins on front crawl kinematics, arm stroke efficiency, coordination, and estimated energy cost. *Frontiers in Physiology*, 14, 1174090. <https://doi.org/10.3389/fphys.2023.1174090>
 - [7] Dybińska, E. (2011). *Uczenie się i nauczanie pływania: Zagadnienia wybrane [Learning and teaching swimming: Selected issues]*. Akademia Wychowania Fizycznego.
 - [8] Eloy, C. (2011). Optimal Strouhal number for swimming animals. *arXiv*. <https://arxiv.org/abs/1102.0223>
 - [9] Ernest, K. (1992). *Fizyka sportu [Physics of sport]*. Wydawnictwo Naukowe PWN.
 - [10] Garayev, K., & Murphy, D. W. (2024). Hydrodynamic scaling of metachronal swimming. *Physical Review Fluids*, 9(11), L111101. <https://doi.org/10.1103/PhysRevFluids.9.L111101>
 - [11] Khatkar, S., & Singh, K. (2024). Biomechanical insights in swimming: Techniques for performance enhancement and injury risk reduction. *International Journal of Current Research and Academic Review*, 12(10). <https://doi.org/10.20546/ijcrar.2024.1210.008>
 - [12] Lauder, G. V., & Drucker, E. G. (2002). Experimental hydrodynamics of fish locomotion: Functional insights from wake visualization. *Integrative and Comparative Biology*, 42(2), 243–257. <https://doi.org/10.1093/icb/42.2.243>
 - [13] Lauder, G. V., & Madden, P. G. A. (2007). Fish locomotion: Kinematics and hydrodynamics of flexible foil-like fins. *Experiments in Fluids*, 43, 641–653. <https://doi.org/10.1007/s00348-007-0357-4>
 - [14] Lighthill, M. J. (1969). Hydromechanics of aquatic animal propulsion. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 1(1), 413–446. <https://doi.org/10.1146/annurev.fl.01.010169.002213>
 - [15] Liu, J., & Hu, H. (2006). Biologically inspired robots: Fish-like locomotion and hydrodynamics. *International Journal of Automation and Computing*, 3(4), 336–347. <https://doi.org/10.1007/s11633-006-0336-9>
 - [16] Microsoft Corporation. (2025). *Sugestie językowe i twórcze wspomaganie treści: Materiały wspomagające proces redakcyjny oraz uwagi dotyczące cytowania źródeł AI w publikacji naukowej [Unpublished internal material]*. Microsoft.
 - [17] Minetti, A. E. (2006). *Economy and efficiency of swimming at the surface with fins of different sizes and stiffness*. IRIS Institutional Repository, University of Milan.
 - [18] Seo, J. H., Zhou, J., & Mittal, R. (2025). Scaling laws for caudal fin swimmers incorporating hydrodynamics, kinematics, morphology, and scale effects. *arXiv*. <https://arxiv.org/abs/2507.11665>
 - [19] Toussaint, H. M., & Beek, P. J. (1992). Biomechanics of competitive front crawl swimming. *Sports Medicine*, 13(1), 8–24. <https://doi.org/10.2165/00007256-199213010-00002>
 - [20] Triantafyllou, M. S., Triantafyllou, G. S., & Yue, D. K. P. (2000). Hydrodynamics of fishlike swimming. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 32, 33–53. <https://doi.org/10.1146/annurev.fluid.32.1.33>
 - [21] Triantafyllou, M. S., Triantafyllou, G. S., & Gopalkrishnan, R. (1991). Wake mechanics for thrust generation in oscillating foils. *Physics of Fluids A: Fluid Dynamics*, 3(12), 2835–2837. <https://doi.org/10.1063/1.858173>
 - [22] Waade, B. (Ed.). (2003). *Pływanie sportowe i ratunkowe: Teoria i metodyka [Competitive and lifesaving swimming: Theory and methodology]*. Akademia Wychowania Fizycznego.
 - [23] Zamparo, P., Pendergast, D. R., Termin, B., & Minetti, A. E. (2006). Economy and efficiency of swimming at the surface with fins of different size and stiffness. *European Journal of Applied Physiology*, 96(4), 459–470. <https://doi.org/10.1007/s00421-005-0075-7>
 - [24] Zamparo, P., Pendergast, D. R., Termin, B., & Minetti, A. E. (2002). How fins affect the economy and efficiency of human swimming. *Journal of Experimental Biology*, 205(17), 2665–2676. <https://doi.org/10.1242/jeb.205.17.2665>

Mikrobiologiczne ogniwa paliwowe: ewolucja technologii i perspektywy jej wykorzystania

Microbial fuel cells: the evolution of the technology and prospects for its use

Monika Humaj^{1*}, Jerzy Mikosz², Gian Francesco Meloni³

¹ Politechnika Krakowska im. Tadeusza Kościuszki, Szkoła Doktorska PK, Wydział Inżynierii Środowiska i Energetyki, Katedra Technologii Środowiskowych

² Politechnika Krakowska, Wydział Inżynierii Środowiska i Energetyki, Katedra Technologii Środowiskowych

³ University of Cagliari, Faculty of Engineering and Architecture, Department of Environmental Engineering.

* Kontakt / Correspondence: monika.humaj@doktorant.pk.edu.pl

Streszczenie:

W artykule przedstawiono historię rozwoju mikrobiologicznych ogniw paliwowych od ich powstania do czasów współczesnych. Wskazano na najważniejsze ograniczenia w zastosowaniu, które związane były z niskim natężeniem prądu i niestabilnością układów. Omówiono rozwój technologii oparty na doborze mikroorganizmów, wzbogacaniu substratu oraz optymalizacji materiałowej anod, membran i katalizatorów. Opisano również współczesne zastosowania MFC w roli biosensorów oraz źródeł zasilania dla urządzeń rozproszonych. Podano także przykłady wdrożeń pilotażowych MFC w oczyszczalniach ścieków i przedstawiono główne wyzwania, które na obecnym etapie rozwoju stanowią barierę dla powszechnego wykorzystania tego rozwiązania w skali przemysłowej.

Słowa kluczowe:

ogniwa paliwowe, biosensory, wdrożenia pilotażowe MFC

Abstract:

The article presents the history of the development of microbial fuel cells from their inception to the present day. It highlights the most significant limitations in their application, which were related to low current density and system instability. It discusses the development of technology based on the selection of microorganisms, substrate enrichment and material optimisation of anodes, membranes and catalysts. It also describes contemporary applications of MFCs as biosensors and power sources for distributed devices. Examples of MFC pilot implementations in sewage treatment plants are given and the main challenges that currently constitute a barrier to the widespread use of this solution on an industrial scale are presented.

Keywords:

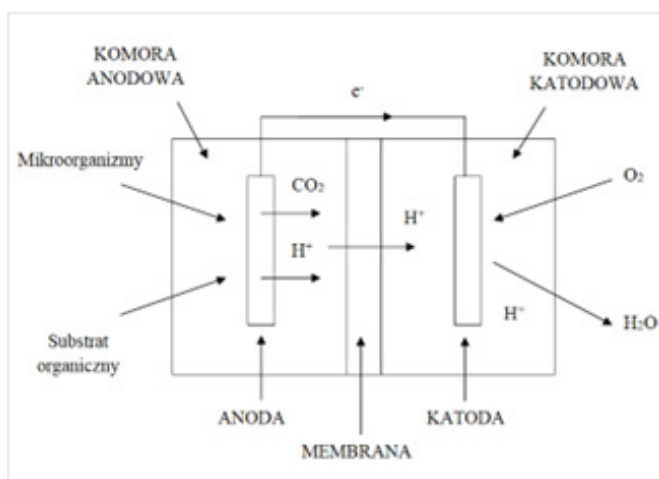
fuel cells, biosensors, MFC pilot implementations

1. Wprowadzenie

Mikrobiologiczne ogniwo paliwowe (rys. 1) jest urządzeniem, w którym energia elektryczna wytwarzana jest w procesie utleniania materii organicznej przez mikroorganizmy. Proces ten opiera się na potencjale redoks pomiędzy donorem i akceptorem elektronów, jednak, w przeciwieństwie do chemicznych ogniw paliwowych, zamiast bezpośredniej reakcji wodoru i tlenu, energię dostarczają żywe komórki bakteryjne [9].

Choć istnieje wiele różnych konfiguracji, standardowy system MFC zbudowany jest z katody i anody, które oddzielone są od siebie za pomocą membrany

półprzepuszczalnej. W komorze anodowej, utrzymywanej w warunkach beztlenowych, znajduje się anoda (wykonana zazwyczaj z materiałów węglowych) oraz biofilm złożony z mikroorganizmów. Bakterie metabolizują materię organiczną, w wyniku czego dochodzi do rozrywania wiązań chemicznych i uwolnienia elektronów oraz protonów H⁺. Poprzez bezpośredni kontakt między białkami błonowymi a materiałem anody (zewnątrzkomórkowy transfer elektronów, EET) dochodzi do przeniesienia elektronów z wnętrza komórki na powierzchnię anody. Równocześnie protony uwalniane są do elektrolitu, a następnie przemieszczają się do komory katodowej. Transport ten odbywa się poprzez membranę, która przepusz-



Rys. 1. Schemat działania MFC, opracowanie własne
Fig. 1. MFC operation diagram, own work

cza protony i jednocześnie blokuje transport elektronów. Przepływ protonów przez membranę napędzany jest różnicą stężeń oraz różnicą potencjałów elektrochemicznych między komorami. Jako, że elektrony powstałe na anodzie nie mogą bezpośrednio przepłynąć przez membranę, skierowane zostają na obwód zewnętrzny. Tam dochodzi do utworzenia się różnicy potencjałów, co przekłada się na powstanie napięcia elektrycznego. Następnie elektrony, które przepłynęły przez obwód zewnętrzny, docierają do katody, gdzie łączą się z akceptorem elektronów (w większości MFC jest to tlen). Wytwarzany jest w ten sposób produkt uboczny procesu, czyli woda. Katoda jest zazwyczaj wykonana z materiału węglowego, pokrytego katalizatorem, który ułatwia redukcję tlenu [9].

2. Początki rozwoju koncepcji MFC

Za początki mikrobiologicznych ogniw paliwowych uważa się odkrycie Pottera, który w 1911 r. udowodnił występowanie zjawiska wytwarzania energii elektrycznej wskutek rozkładu substratów organicznych przez mikroorganizmy [25]. W trakcie doświadczeń przeprowadzonych na drożdżach *Saccharomyces cerevisiae* podczas fermentacji cukrów, wygenerowane zostało napięcie elektryczne wynoszące 0,3 – 0,5 V. Potter podobne zjawisko zaobserwował także dla bakterii *Escherichia coli*. Skalowalność tego rozwiązania zbadał w 1931 r. Cohen [12]. Przeprowadzone przez niego doświadczenie opierało się na szeregowym połączeniu wielu miniaturowych półogniw o objętości 10 ml z fermentującymi bakteriami. Choć utworzony w ten sposób układ wygenerował 35 V napięcia, uzyskano bardzo małe natężenie, rzędu 2 mA. Cohen wykazał tym samym, że zwiększanie liczby ogniw pozwala podnieść napięcie, lecz istnieje problem minimalnego natężenia prądu, a także złożoności takiego układu.

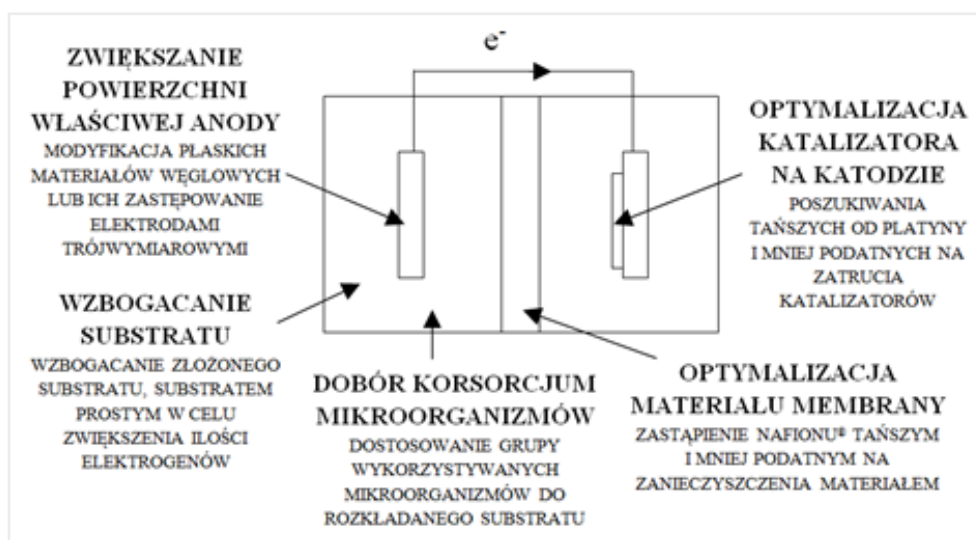
W latach 60. XX wieku rozwojem układów elektrochemicznych zaczęła interesować się amerykańska agencja lotów kosmicznych NASA. Przy planowaniu misji załogowych rozważano możliwość wykorzystania mikroorganizmów do jednoczesnego utylizowania odpadów organicznych oraz produkcji energii. W wyniku przeprowadzonych

badan wykazano, że mikrobiologiczne przetwarzanie moczu przez bakterie *Bacillus pasteurii* bezpośrednio wpływało na zdolność generowania prądu elektrycznego w ogniwie elektrochemicznym. Ostatecznie system nie został jednak wykorzystany w misjach kosmicznych, ze względu na niską gęstość uzyskiwanej mocy w stosunku do masy systemu oraz problemy ze stabilnością układu [6]. Do przełomowych wniosków w swoich badaniach doszedł Williams, który wykazał, że źródłem energii elektrycznej mogą być fermentujące odpady roślinne [29]. W swoim układzie w roli substratu wykorzystał łuski ryżu, które zostały poddane fermentacji beztlenowej. W swoim doświadczeniu Williams wygenerował 40 mA prądu o napięciu 6 V. Mimo stosunkowo wysokich prądów, rozwiązanie ograniczała niestabilność oraz niska sprawność układu.

Na początku lat 80. pojawiła się koncepcja wykorzystania MFC z mediatorami, czyli ze związkami redoks przenoszącymi elektrony z wnętrza komórek mikroorganizmów na powierzchnię anody (zastępują one bezpośredni transfer elektronów w przypadku bakterii pozbawionych efektywnego EET). Dodatkowo wykazano, że mediatorzy redukują się szybciej niż komórka produkuje elektrony, co oznacza, iż głównymi ograniczeniami MFC z mediatorem nie jest biologia komórki, a właściwości mediatora i elektrod [27].

Niezależnie od badań nad mediatorami, prowadzone były analizy zastosowania MFC z innymi substratami. W 1984 r., w wyniku zasilenia MFC odpadami zawierającymi laktozę, wykazano, że układ może pracować w systemie ciągłym przez dwa tygodnie, przy uzupełnianiu substratu [27]. W kolejnych latach udowodniono możliwość przetwarzania sacharozy w układzie z *Proteus vulgaris* oraz mediatorem w postaci tioniny, a także przetestowano w roli substratu ścieki i odpady węglowodanowe [3]. Pierwszą praktyczną demonstrację wykorzystania MFC w rzeczywistej oczyszczalni ścieków przeprowadzili Habermann i Pommer. W zaprojektowanym przez nich systemie MFC wykorzystano mikroorganizmy SRB (Sulfate-Reducing Bacteria), które generowały naturalny mediator, siarkowodór. Pozwoliło to na rezygnację z mediatorów syntetycznych, co ograniczyło koszty, a także zapewniło samowystarczalność układu. Układ Habermanna i Pommera działał w systemie pracy ciągłej przez pięć lat, co udowodniło, że MFC może być wykorzystane jako długoterminowa technologia do oczyszczania ścieków komunalnych [13].

Pod koniec lat 90. XX wieku wykazano, że bakterie redukujące metale tj. *Shewanella putrefaciens*, potrafią zasilić MFC bez egzogennych mediatorów. Kim w trakcie swoich badań wykazał elektroaktywność komórek *Shewanella putrefaciens* hodowanych beztlenowo oraz generację prądu z mleczanu przy braku barwników redoks, co interpretowano jako bezpośredni kontaktowy transfer elektronów (DET) przez zewnętrzne cytochromy do anody. Choć *Shewanella putrefaciens* utleniały mleczań niecałkowicie, co prowadziło do wytwarzania nieznacznej ilości energii, wskazało to na zdolność niektórych mikroorganizmów do bezpośredniego przenoszenia elektronów do elektrod [18].



Rys. 2. Kierunki usprawniania MFC, opracowanie własne
Fig. 2. Directions of MFC improvement, own study

3. Optimalizacja i doskonalenie układów MFC

Efektywność MFC zależy od parametrów i dopasowania poszczególnych komponentów systemu, tj. elektrod, membran, wykorzystanych mikroorganizmów i substratów. Na przestrzeni lat optymalizowano poszczególne elementy układu i tworzone różne konfiguracje po to, by uzyskać jak najlepsze parametry pracy systemu (rys. 2). Choć w początkowych MFC używano mikroorganizmy bez rozwiniętego DET, na przełomie XX i XXI wieku zaczęto poszukiwać bakterii cechujących się bezpośrednim kontaktowym transferem elektronów, co umożliwiało całkowitą rezygnację z wykorzystania mediatorów syntetycznych. Przy wykorzystaniu *Geobacter sulfurreducens* w MFC wykazano, że mikroorganizm tworzy stabilny biofilm na anodzie i podtrzymuje prąd po pełnej wymianie pożywki [4]. Wśród najbardziej znanych egzoelektrogenów wyróżnia się również mikroorganizmy z rodziny *Shewanella* [18].

W przypadku wykorzystania substratu złożonego, materia organiczna musi w pierwszej kolejności zostać zhydrolizowana do cukrów prostych, następnie sfermentowana do lotnych kwasów tłuszczowych, a w ostatnim etapie – utleniona przez egzoelektrogeny. Dla celulozy komponentem hydrolityczno-fermentacyjnym jest np. *Clostridium cellulolyticum*. Przy wytwarzaniu energii elektrycznej w MFC z wykorzystaniem otrębów ryżowych (60% poliacharydów), możliwe jest zastosowanie konsorcjum mikroorganizmów, w którym *Clostridium* degraduje polimerową celulozę do glukozy, część glukozy jest fermentowana do kwasów organicznych przez *Clostridium* i *Bacteroides*, a następnie kwasy te są zużywane przez *Geobacter* do transferu elektronów na anodę [32]. Substrat w postaci pulpy ziemniaczanej może być rozkładany przez hydrolityczno-fermentacyjne bakterie z rodzajów *Bacteroides*, *Flavobacterium* (rozkład skrobi) oraz *Ruminococcus* (rozkład celulozy) [28].

Proces adaptacji mikroorganizmów zwiększa efek-

tywność wytwarzania energii przez MFC wykorzystujące ścieki bytowe. Wzbogacanie w *Geobacter sulfurreducens*, poprzez dodanie do ścieków octanu, zwiększa wydajność kulombowską, ale nie całkowitą produkcję prądu, która nie może się odbywać w wyniku braku wystarczającej ilości hydrolizatorów i fermentatorów [11].

Jedną z metod poprawy wydajności MFC jest zwiększenie powierzchni właściwej anody, co umożliwia efektywniejszą kolonizację bakterii egzoelektrogenicznych i, tym samym, zwiększa transfer elektronów. Konieczne jest przy tym uwzględnienie porowatości

materiału, ponieważ zbyt małe pory tj. 2–7 μm , jak np. w pianie węglowej, są zatykane przez biofilm, co prowadzi do obumierania bakterii wewnątrz oraz spadku generowanej mocy. Wykorzystanie anody szczotkowej, składającej się z wielu cienkich włókien węglowych, pozwoliło na zwiększenie maksymalnej gęstości mocy z 1070 mW/m^2 , osiąganą przez MFC z anodą z tkaniny węglowej, do 2400 mW/m^2 , co wynikało m.in. ze wzrostu efektywnej powierzchni anody oraz redukcji oporu wewnętrznego MFC [23].

Dla zwiększenia efektywności materiałów węglowych zaproponowano także nanorurki węglowe (CNT), które pozwoliły na osiągnięcie o 68% wyższej maksymalnej gęstości mocy od analogicznego MFC wykorzystującego anodę z tkaniny węglowej. Nanorurki węglowe są jednak toksyczne dla mikroorganizmów, ponieważ uszkodzają struktury błon komórkowych, [17].

Testując możliwości poprawy wydajności MFC wykazano, że poddanie anody węglowej obróbce amoniakiem w wysokiej temperaturze skutkuje wprowadzeniem grup zawierających azot na powierzchnię, co zwiększa reaktywność powierzchni [23].

Dla poprawy efektywności MFC korzystna jest modyfikacja grafenem, co wynika m.in. z wysokiej przewodności i dużej powierzchni właściwej materiału. Dla grafenu pozyskiwanego w redukcji chemicznej powierzchnia właściwa jest większa od powierzchni filcu grafitowego ok. 500 razy [33].

Zwiększanie chropowatości powierzchni i poprawa przewodności powierzchni elektrody możliwe jest również poprzez modyfikację anody polimerami. Modyfikacja anody z filcu węglowego materiałami polimerowymi pozwoliła na zwiększenie gęstości mocy względem MFC z anodą niemodyfikowaną o 35% dla polianiliny PANI oraz o 18% dla polimeru PAOA. Wynika to m.in. z szybszego zasiedlenia anod przez bakterie, poprawy różnorodności mikrobiologicznej na anodach modyfikowanych oraz redukcji oporu wewnętrznego [20].

Biomasa roślinna po odpowiedniej obróbce termicznej

zostaje przekształcona w węgiel porowaty, który może znaleźć zastosowanie jako efektywny i niskokosztowy materiał elektrodowy. Porównanie anody z biocharu aktywowanego KOH i nieaktywowanego wykazało, że aktywacja materiału, w wyniku wytworzenia mezoporowej struktury na powierzchni elektrody, zwiększa dwukrotnie osiągnięte przez MFC gęstości mocy, które mogą przewyższać gęstości mocy osiągnięte przez materiały konwencjonalne tj. filc grafitowy [31]. Wykorzystanie anody z łupin kasztanów poddanych karbonizacji i aktywacji w MFC pozwoliło na uzyskanie 2,3-razy większej gęstości mocy od analogicznego układu wykorzystującego tkaninę węglową [10]. Anoda z węgla pochodzącego z odpadów kawowych w układzie MFC doprowadziła do osiągnięcia maksymalnej gęstości mocy równej 3800 mW/m² [14].

Kluczowym elementem warunkującym efektywność MFC jest katoda. Jako, że, zachodząca na niej, reakcja redukcji tlenu ORR jest powolna i stanowi czynnik limitujący osiąganą moc, współcześnie wykorzystuje się katalizatory przyspieszające przebieg procesu. Standardowe katalizatory platynowe, choć cechują się wysoką aktywnością w ORR, są drogie i podatne na zatrucia siarkowodorem, co prowadzić może do zaniku stabilności MFC [5]. Wykazano, że dobrymi właściwościami katalitycznymi charakteryzuje się tlenek manganu o strukturze krystalicznej OMS-2 (*Octahedral Molecular Sieve-2*). Domieszkowanie kobaltem lub miedzią pozwoliło na zwiększenie efektywności katalizatora MnO₂ i uzyskanie gęstości mocy wyższych niż w przypadku zastosowania tradycyjnych katalizatorów platynowych. Katalizator MnO₂ z domieszkami wykazuje się również dwukrotnie wyższym parametrem usuwania COD, jest znacznie tańszy od platyny i bardziej odporny na zatrucia [24].

Dla redukcji kosztów katalizatorów oraz zwiększenia efektywności ORR na katodzie wykorzystać można również stopy platyny z innymi metalami. Katalizator Pt-Ni w MFC umożliwił wytworzenie gęstości mocy 3,5-krotnie wyższej niż miało to miejsce przy wykorzystaniu katalizatora platynowego, co było wynikiem synergicznego działania platyny i niklu w stopie prowadzącego do obniżenia nadpotencjału redukcji tlenu [7].

Od początku rozwoju technologii MFC, najpopularniejszym materiałem wykorzystywanym w roli membrany PEM jest Nafion®, czyli perfluorowany polimer kwasu sulfonowego, co wynika z wysokiej przewodności protonowej oraz stabilności chemicznej i termicznej materiału. W związku z wykazaniem niekorzystnych cech Nafionu tj. wyciek tlenu na anodę, preferencyjny transport występujących w dużych stężeniach kationów i ich reakcja na katodzie, strata substratu i zanieczyszczenie biofilmem po dłuższym czasie eksploatacji oraz wysokimi kosztami tego materiału zaczęto testować możliwość wykorzystania w roli membrany innych materiałów [8].

Jedną z pierwszych alternatyw były membrany sulfonowe powstałe na bazie polimerów aromatycznych. Sulfonowany polieteroeteroketon SPEEK jest polimerem, który po wprowadzeniu grup sulfonowych -SO₃H, zyskuje zdolność przewodzenia protonów. Dla uzyskania odpowiednio wysokiego przewodnictwa konieczne jest zapewnienie wy-

sokiego stopnia sulfonowania DS, który jednak może powodować pęcznienie i rozpuszczanie polimeru, co obniża jego wytrzymałość i stabilność chemiczną [21].

Dużą grupę stanowią membrany porowate, które, choć fizycznie oddzielają komory anodową i katodową, nie posiadają aktywnych grup jonowymiennych, w związku z czym transport ładunku odbywa się poprzez swobodną dyfuzję wszystkich jonów przez wypełnione elektrolitem pory. Cechują się nieselektywnością jonową, w wyniku czego przenoszone mogą być zarówno kationy, jak i aniony, zgodnie z gradientem stężeń [26]. Przykład membran porowych stanowią niskokosztowe membrany tekstylne, tj. J-cloth. Materiał wykazuje się dobrą przepuszczalnością dla jonów oraz łatwą dostępnością, jednak jego sprawność kulombowska jest niska w porównaniu do innych separatorów [34].

Do membran porowatych zalicza się również membrany ceramiczne. W wyniku spiekania gliny naturalnej tworzy się porowata struktura umożliwiająca transport protonów poprzez ich przeskakiwanie między ujemnie naładowanymi grupami tj. krzemiany i gliniany. Jedną z głównych wad membran ceramicznych jest występowanie zjawiska odkładania się biofilmu na katodzie, co wynika m.in. z wysokiej porowatości materiału i braku selektywności jonowej w membranie [15].

Dla obniżenia kosztów i uproszczenia konstrukcji MFC możliwe jest wykorzystanie układu pozbawionego membrany. Do zalet tego typu rozwiązania zalicza się redukcję całkowitej rezystancji układu, co wynika z wyeliminowania oporu membrany i zapewnienia swobodnego przemieszczania się protonów i innych kationów w całej objętości ogniwa. Opracowane ogniwo jednokomorowe z katodą powietrzną, pozbawione membrany polimerowej i substratem w postaci glukozy umożliwiło uzyskanie gęstość mocy 494 mW/m², co stanowiło wartość niemal dwukrotnie większą od otrzymywanych gęstości mocy w tradycyjnych, dwukomorowych układach z membraną PEM [22]. Ze względu na dyfuzję tlenu na anodzie szacuje się, że MFC pozbawione membrany osiągają sprawność kulombowską niższą od układów konwencjonalnych o ok. 20% [19].

4. Wyzwania stojące przed wdrożeniem MFC

Jednym z obszarów zastosowań MFC są biosensory, które wykorzystują zależność pomiędzy generowanym sygnałem elektrycznym a biochemicznym zapotrzebowaniem na tlen BOD, chemicznym zapotrzebowaniem na tlen COD lub stężeniem substancji toksycznych. Konstruowane są również czujniki zanurzalne, które cechują się możliwością mierzenia BOD zbiorników wodnych, co eliminuje konieczność pobierania próbek i przeprowadzania konwencjonalnych testów laboratoryjnych. Czujniki oparte na MFC wykazują jednak ograniczone m.in. przez zmieniającą się w czasie strukturę biofilmu na elektrodach oraz obecność substancji toksycznych zaburzających sygnał elektryczny [30].

Innym kierunkiem rozwoju współczesnych MFC jest

wykorzystanie ich jako źródeł energii dla rozproszonych urządzeń. Dzięki zdolności do wykorzystywania materii organicznej pochodzącej m.in. z osadów dennnych, gleb lub ścieków, MFC może zapewnić długotrwałe zasilanie off-grid. Glebowe MFC z anodą pod powierzchnią ziemi oraz katodą ulokowaną na jej powierzchni mogą być wykorzystywane do zasilania sieci czujników bezprzewodowych. Ciągłe zasilanie urządzeń wyłącznie z MFC jest możliwe jednak tylko dla sprzętu o bardzo niskim zapotrzebowaniu energetycznym [16].

Ze względu na możliwość jednoczesnego usuwania zanieczyszczeń organicznych i odzysk energii, jednym z najbardziej obiecujących obszarów rozwoju MFC są oczyszczalnie ścieków. W ostatnich latach przeprowadzono szereg pilotażowych wdrożeń, które miały na celu ocenić wydajność tej technologii w warunkach zbliżonych do rzeczywistych. Jednym z nich jest technologia BETT (z ang. *Bioelectrochemical Treatment Technology*). BETT opiera się na modułowym systemie MFC w układzie przepływowym, których głównym zadaniem jest oczyszczanie ścieków przemysłowych oraz redukcja emisji CO₂. Składa się on z 28 połączonych szeregowo jednostek anodowych, które wykonane zostały z przewodzącego rdzenia pokrytego materiałem z włókna węglowego. Do układu szeregowo podłączone są dwie powietrzne katody. Układ pilotażowy, złożony z 12 układów BETT, zbiorników wyrównawczych, zasilających i zbiorczych, przetestowano w USA na przepływie ścieków browarniczych wynoszącym 0,6 m³/d. Przy hydraulicznym czasie retencji HRT równym 4h osiągnięto efektywność usuwania COD wynoszącą 33% oraz całkowitej zawiesiny TSS 79%. Zmierzona gęstość mocy układu BETT wyniosła 114 mW/m² [2]. W podobny sposób układ MFC wykorzystano do oczyszczania odpadów trzody chlewnej w Kalifornii. Układ złożony z 12 jednokomorowych MFC połączonych szeregowo wykazał efektywność usuwania COD do 65% oraz odzysk energii netto wynoszący 0,11 kWh/kg COD [1].

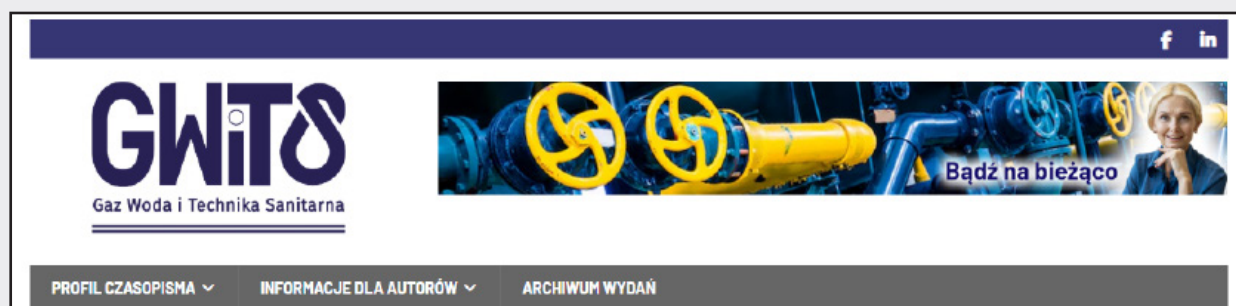
Mimo korzyści MFC, masowe wdrożenie tej technologii w oczyszczalniach i zakładach przemysłowych wymaga przezwyciężenia licznych wyzwań. Jedną z podstawowych trudności jest skalowanie, które prowadzi do wzrostu oporów wewnętrznych wynikających m.in. z dłuższej drogi jonów w większych komorach i gorszej dyfuzji substratu do głębszych warstw biofilmu, a także do problemów z jednorodnością warunków w reaktorze. Pilotażowe MFC wykazują dużą zmienność wydajności w zależności od warunków środowiskowych tj. zmiany pH, temperatura i obciążenie organiczne [9]. MFC jednak wciąż stanowią technologię rozwijającą się, a postęp w obszarze materiałoznawstwa i technologii może stopniowo eliminować bariery, czyniąc MFC konkurencyjnym i zrównoważonym rozwiązaniem w gospodarce odpadami i w zasilaniu urządzeń.

Literatura

- [1] Chakma, R., Hossain, M. K., Paramasivam, P., Bousbih, R., Amami, M., Toki, G. I., Halder, R., & Karmaker, A. K. (2025). Recent applications, challenges, and future prospects of microbial fuel cells: A review. *Global Challenges*, 9(5). <https://doi.org/10.1002/gch2.202500004>
- [2] Potter, M. C. (1911). Electrical effects accompanying the decomposition of organic compounds. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 84(571), 260–276.
- [3] Cohen, B. (1931). The bacterial culture as an electrical half-cell. *Journal of Bacteriology*, 21, 18–19.
- [4] Canfield, J. H., Goldner, B. H., & Lutwack, R. (1963). Research on applied bioelectrochemistry. Report no. 1. *Utilization of human wastes as electrochemical fuels*. Magna Corporation; National Aeronautics and Space Administration.
- [5] Williams, K. R. (1966). *An introduction to fuel cells*. Elsevier Publishing Company.
- [6] Roller, S. D., Bennetto, H. P., Delaney, G. M., Mason, J. R., Stirling, J. L., & Thurston, C. D. (1984). Electron-transfer coupling in microbial fuel cells, 1: Comparison of redox mediator reduction rates and respiratory rates of bacteria. *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*, 34(1), 3–12.
- [7] Bennetto, H. P., Delaney, G. M., Mason, J. R., Roller, S. D., Stirling, J. L., Thurston, C. F., & White, D. R., Jr. (1986). An electrochemical bioreactor for treatment of carbohydrate wastes and effluents. *Alternative Energy Sources*, 4, 143–157.
- [8] Habermann, W., & Pommer, E. H. (1991). Biological fuel cells with sulphide storage capacity. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 35(1), 128–133.
- [9] Kim, B. H., Kim, H. J., Hyun, M. S., & Park, D. H. (1999). Direct electrode reaction of Fe(III)-reducing bacterium, *Shewanella putrefaciens*. *Journal of Microbiology and Biotechnology*, 9(2), 127–131.
- [10] Bond, D. R., & Lovley, D. R. (2002). Electricity production by Geobacter sulfurreducens attached to electrodes. *Applied and Environmental Microbiology*, 69(3), 1548–1555.
- [11] Yoshimura, Y., Nakashima, K., Kato, M., Inoue, K., Okazaki, F., Soyama, H., & Kawasaki, S. (2018). Electricity generation from rice bran by a microbial fuel cell and the influence of hydrodynamic cavitation pretreatment. *ACS Omega*, 3(11), 15267–15271. <https://doi.org/10.1021/acsomega.8b02171>
- [12] Tian, Y., Mei, X., Liang, Q., Wu, D., Ren, N., & Xing, D. (2017). Biological degradation of potato pulp waste and microbial community structure in microbial fuel cells. *RSC Advances*, 7, 8376–8380. <https://doi.org/10.1039/C6RA28599A>
- [13] Christgen, B., Spurr, M., Milner, E. M., Izadi, P., McCann, C., Yu, E., Curtis, T., Scott, K., & Head, I. M. (2023). Does pre-enrichment of anodes with acetate to select for Geobacter spp. enhance performance of microbial fuel cells when switched to more complex substrates? *Frontiers in Microbiology*, 14, 1199286. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2023.1199286>
- [14] Logan, B. E., Cheng, S., Watson, V., & Estadt, G. (2007). Graphite fiber brush anodes for increased power production in air-cathode microbial fuel cells. *Environmental Science & Technology*, 41(9), 3341–3346.
- [15] Karwowska, E., Miaśkiewicz-Pęcka, E., & Załęska-Radziwiłł, M. (2015). Wpływ nanoproductów na wybrane organizmy – ocena ekotoksykologiczna. *Inżynieria i Ochrona Środowiska*, 18(1), 109–118.
- [16] Li, C., Zhang, L., Ding, L., Ren, H., & Cui, H. (2011). Effect of conductive polymers coated anode on the performance of a microbial fuel cell (MFCs) and its biodiversity analysis. *Biosensors and Bioelectronics*, 26(10), 4169–4176.
- [17] Yin, H., Zhang, M., Xu, X., & Chen, X. (2025). Modulation of biomass-based anode specific surface area and electrical conductivity on the enhancement of microbial fuel cell po-

- wer generation capacity. *Journal of Chemical Technology & Biotechnology*. <https://doi.org/10.1002/jctb.70097>
- [18] Chen, Q., Pu, W., Hou, H., Hu, J., Liu, B., Li, J., Cheng, K., Huang, L., Yuan, X., Yang, C., & Yang, J. (2018). Activated microporous-mesoporous carbon derived from chestnut shell as a sustainable anode material for high performance microbial fuel cells. *Bioresource Technology*, 249, 567–573.
- [19] Hung, Y.-H., Liu, T.-Y., & Chen, H.-Y. (2019). Renewable coffee waste-derived porous carbons as anode materials for high-performance sustainable microbial fuel cells. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 7(20), 16991–16999.
- [20] Brouzgou, A., Song, S. Q., & Tsiakaras, P. (2012). Low and non-platinum electrocatalysts for PEMFCs: Current status, challenges and prospects. *Applied Catalysis B: Environmental*, 127, 371–388.
- [21] Lu, M., Kharkwal, S., Ng, H. Y., & Li, S. F. Y. (2010). Carbon nanotube supported MnO₂ catalysts for oxygen reduction reaction and their applications in microbial fuel cells. *Biosensors and Bioelectronics*, 26(12), 4728–4732.
- [22] Cetinkaya, A. Y., Ozdemir, O. K., Koroglu, E. O., Hasimoglu, A., & Ozkaya, B. (2015). The development of catalytic performance by coating Pt–Ni on CMI7000 membrane as a cathode of a microbial fuel cell. *Bioresource Technology*, 195, 188–193.
- [23] Chae, K.-J., Choi, M.-J., Lee, J., Kim, I. S., & Kim, K. Y. (2007). Effect of proton exchange membranes on performance of microbial fuel cells. *Journal of Power Sources*, 171(2), 348–354.
- [24] Li, L., Zhang, J., & Wang, Y. (2003). Sulfonated poly(ether ether ketone) membranes for direct methanol fuel cells. *Journal of Membrane Science*, 226(1–2), 159–167.
- [25] Ramírez-Nava, J., Martínez-Castrejón, M., García-Mesino, R. L., López-Díaz, J. A., Talavera-Mendoza, O., Sarmiento-Villagrana, A., Rojano, F., & Hernández-Flores, G. (2021). The implications of membranes used as separators in microbial fuel cells. *Membranes*, 11(10), 738. <https://doi.org/10.3390/membranes11100738>
- [26] Zhang, X., Cheng, S., Wang, X., Huang, X., & Logan, B. E. (2009). Separator characteristics for increasing performance of microbial fuel cells. *Environmental Science & Technology*, 43(21), 8456–8461.
- [27] Liu, H., & Logan, B. E. (2004). Electricity generation using an air-cathode single chamber microbial fuel cell in the presence and absence of a proton exchange membrane. *Environmental Science & Technology*, 38(14), 4040–4046.
- [28] Leong, J. X., Wan Daud, W. R., Ghasemi, M., Liew, K. B., & Ismail, M. (2013). Ion exchange membranes as separators in microbial fuel cells for bioenergy conversion: A comprehensive review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 28, 575–587.
- [29] Yao, H., Xiao, J., & Tang, X. (2023). Microbial fuel cell-based organic matter sensors: Principles, structures and applications. *Bioengineering*, 10(8), 886. <https://doi.org/10.3390/bioengineering10080886>
- [30] Jalili, P., Ala, A., Nazari, P., Jalili, B., & Domiri Ganji, D. (2024). A comprehensive review of microbial fuel cells considering materials, methods, structures, and microorganisms. *Heliyon*, 10(3), e25439. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e25439>
- [31] Babanova, S., Jones, J., Wiseman, K., Soles, J., Gracia, J., Huerta, P., Barocio, D., Naito, R., Arreola, O., Gracia, G., & Bretschger, O. (2022). Bioelectrochemical treatment technology—The new practical approach for wastewater management and GHG emissions reduction. *Frontiers in Chemical Engineering*, 4, 832505. <https://doi.org/10.3389/fceng.2022.832505>
- [32] Babanova, S., Jones, J., Phadke, S., Lu, M., Angulo, C., Gracia, J., Carpenter, K., Cortese, R., Chen, S., Phan, T., & Bretschger, O. (2020). Continuous flow, large-scale, microbial fuel cell system for the sustained treatment of swine waste. *Water Environment Research*, 92(1), 60–67. <https://doi.org/10.1002/wer.1183>
- [33] Jadhav, D. A., Park, S.-G., Eisa, T., Mungray, A. K., Madenli, E. C., Olabi, A.-G., Abdelkareem, M. A., & Chae, K.-J. (2022). Current outlook towards feasibility and sustainability of ceramic membranes for practical scalable applications of microbial fuel cells. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 167, 112708

Odwiedź nową stronę czasopisma
www.GWITS.pl



oraz media społecznościowe:

facebook.com/GazWoda
linkedin.com/company/gazwoda/

Zapraszamy na stronę internetową prowadzoną przez nowego wydawcę. Udostępniamy tam aktualne numery, materiały redakcyjne oraz bieżące informacje.

Energetyka fuzyjna jako przyszłość energetyki światowej

Fusion energy as the future of global energy

Wojciech Kramarek^{1*}

¹ Państwowa Akademia Nauk Stosowanych Im. Ignacego Mościckiego w Ciechanowie, Wydział Inżynierii i Ekonomii,

* Kontakt / Correspondence: wojciech.kramarek@pansim.edu.pl

Streszczenie:

Pierwszy na świecie reaktor jądrowy, o znikomej mocy, zwany „stosem atomowym,” w którym uzyskano kontrolowaną reakcję łańcuchową uruchomiono w grudniu 1942 roku na uniwersytecie w Chicago. Kierownikiem projektu był fizyk Enrico Fermi. Pierwszą na świecie instalację do wytwarzania energii elektrycznej ze źródłem ciepła w postaci reaktora jądrowego uruchomiono w 1951 r. w Stanach Zjednoczonych. Powstanie bomby wodorowej w 1952 r. rozpoczęło prace nad wykorzystaniem energii termojądrowej. Reaktor termojądrowy, fuzyjny to reaktor jądrowy realizujący kontrolowaną syntezę termojądrową lekkich jąder wodoru (deuteru i trytu) w wyniku której powstaje jądro helu, wolny neutron i uwalnia się duża ilość energii. Do poprawnego działania reaktora potrzebne jest wytworzenie bardzo wysokiej temperatury powodującej powstanie plazmy czyli mieszaniny zjonizowanych atomów deuteru i trytu. Potrzebne są także potężne elektromagnesy mające na celu utrzymanie plazmy z dala od ścian reaktora. Do tej pory nie udało się skonstruować reaktora fuzyjnego działającego efektywnie, tj. dającego zysk energii i działającego w sposób ciągły. Obecnie trwające projekty reaktorów termojądrowych to m.in. ITER (Międzynarodowy Eksperymentalny Reaktor Termojądrowy) we Francji i EAST (ang. The Experimental Advanced Superconducting Tokamak) w Chinach.

Słowa kluczowe: Energetyka jądrowa, bomba atomowa, bomba wodorowa, reaktor nuklearny, reaktor jądrowy, reaktor fuzyjny, bezpieczeństwo, systemy bezpieczeństwa pasywne i aktywne, normowanie europejskie i światowe

Abstract:

The world's first low-power nuclear reactor, called an „atomic pile,” in which a controlled chain reaction was achieved, was launched in December 1942 at the University of Chicago. Manager of project was Enrico Fermi, famous physicist. The world's first electricity-generating installation with a nuclear reactor as a heat source was launched in 1951 in the United States. The development of the hydrogen bomb in 1952 initiated work on the use of thermonuclear energy. A thermonuclear fusion reactor is a nuclear reactor that carries out controlled thermonuclear fusion of light hydrogen nuclei (deuterium and tritium), resulting in the formation of a helium nucleus, a free neutron and the release of a large amount of energy. For the reactor to function properly, it is necessary to generate a very high temperature that causes the formation of plasma, i.e. a mixture of ionized deuterium and tritium atoms. Powerful electromagnets are also needed to keep the plasma away from the reactor walls. To date, it has not been possible to construct a fusion reactor that operates efficiently, i.e. produces energy gains and operates continuously. Current thermonuclear reactor projects, among others, include ITER (International Thermonuclear Experimental Reactor) in France and EAST (The Experimental Advanced Superconducting Tokamak) in China.

Keywords: Nuclear energy, atomic bomb, hydrogen bomb, nuclear reactor, fusion reactor, safety, active and passive safety systems, european and world norms

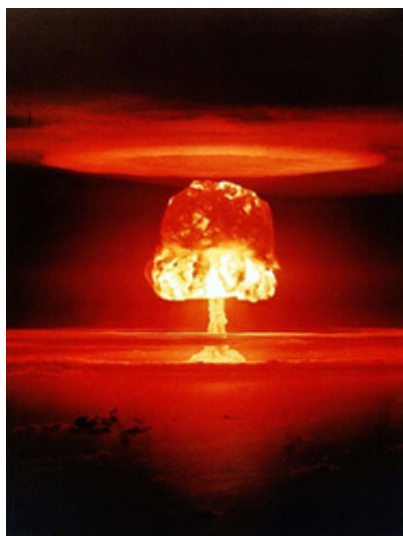
1. Wprowadzenie w energetykę jądrową

W 1938 roku fizycy niemieccy Otto Hahn i Fritz Strassmann przeprowadzili pierwszą na świecie reakcję rozszczepienia jądra atomu.

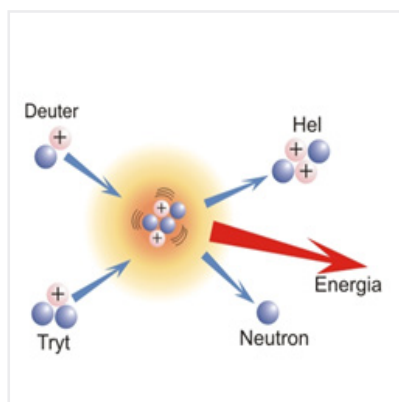
W lutym 1939 roku Hahn i Strassmann przewidzieli wyzwolenie dodatkowych neutronów w czasie rozpadu atomowego czyli powstanie reakcji łańcuchowej. Reakcja

łańcuchowa została udowodniona przez Frédérica Joliot i jego współpracowników w marcu 1939 roku.

W 1933 r. emigrant węgierski fizyk Leo Szilárd, wpadł na pomysł jądrowej reakcji łańcuchowej jako sposobu na jednoczesne uwolnienie i wykorzystanie energii zawartej w atomach. Kilka lat później austriacka naukowiec Lise Meitner i jej siostrzeniec, fizyk Otto Frisch, zauważyli że atom uranu bombardowany neutronami podzieli się na



Rys. 1. Eksplozja ładunku atomowego [12]
Fig. 1. Atomic charge explosion [12]



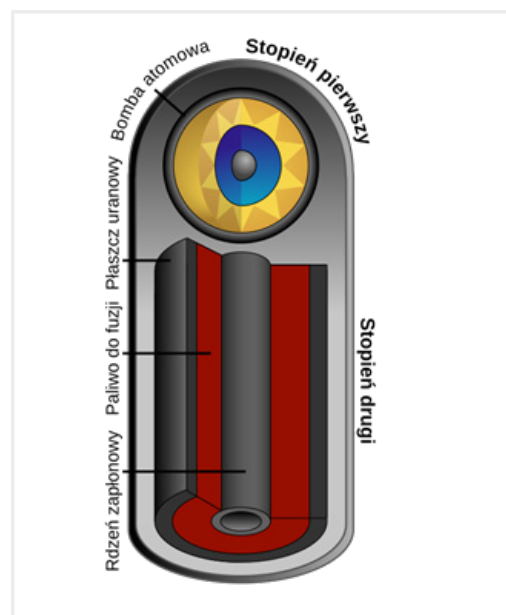
Rys. 2. Reakcja fuzji jądrowej deuteru i trytu, produktami są hel i neutron oraz wydzielą się bardzo dużo energii [12]
Fig. 2. Nuclear fusion reaction of deuterium and tritium, the products are helium and a neutron, and a lot of energy is released [12]

dwie części. Naukowcy wywnioskowali, że w ten sposób można wywołać reakcję łańcuchową, która wyemituje ogromną ilość energii.

Wraz z postępem badań atomowych rosły w obozie aliantów obawy dotyczące programu nazistowskich Niemiec, który mógłby wykorzystać energię atomu do opracowania broni o ogromnej sile rażenia. 2 sierpnia 1939 r. Einstein po rozmowie z Szilardem podpisał list skierowany do prezydenta USA Franklina D. Roosevelta, ostrzegając go przed militarnymi zastosowaniami nowego źródła energii i potencjalnym projektem budowy broni jądrowej w nazistowskich Niemczech. Biorąc pod uwagę ostrzeżenie prezydent Franklin Delano Roosevelt podjął decyzję o uruchomieniu w 1942 r. programu Manhattan noszącego oficjalną nazwę Manhattan Engineering District. Był to amerykański rządowy, tajny program badawczy, którego celem było uzyskanie energii jądrowej i wykorzystanie jej do produkcji nowego typu broni czyli bomby atomowej.

Konstrukcję bomby opracowano w Los Alamos National Laboratory pod kierunkiem dyrektora naukowego projektu, wybitnego fizyka Roberta Oppenheimera. Bomba atomowa to broń masowego rażenia, która wykorzystuje kontrolowaną reakcję łańcuchową rozszczepienia ciężkich jąder atomowych, takich jak uran-235 lub pluton-239. Neutron uderzając w jądro uranu U-235 powoduje jego rozpad. Rozszczepiany atom emituje neutrony, które powodują rozpad następnych jąder atomowych. Rozzerwanie pojedynczego atomu nie daje dużo energii. Z każdego rozzerwania, z każdego rozszczepienia, będzie jej mało, ale w sumie przy olbrzymiej ilości atomów biorących udział w rozpadzie, uzyskamy olbrzymią ilość energii.

Program miał też swoją część zmierną do opracowania sposobów niedestrukcyjnego użycia energii atomowej, dzięki czemu opracowano konstrukcje i wyprodukowano pierwszy reaktor jądrowy. Wykorzystywał on (podobnie jak obecnie działające reaktory) reakcje rozszczepienia jąder atomowych. Pierwszy reaktor (uranowo-grafitowy), Chicago Pile no. 1 („Stos chicagowski nr 1”, CP-1) o małej mocy zbudowany został na Uniwersytecie



Rys. 3. Bomba termojądrowa według projektu Ulama-Tellera [15]
Fig. 3. Thermonuclear bomb designed by Ulam-Teller [15]

w Chicago pod kierunkiem włoskiego uczonego Enrica Fermiego. Pierwsza kontrolowana reakcja łańcuchowa została w nim zapoczątkowana 2 grudnia 1942.

16 lipca 1945 r. przeprowadzono pierwszy w historii testowy wybuch bomby atomowej („Gadżet” / „Trinity”) w stanie Nowy Meksyk, a niedługo potem zrzucono dwie bomby na japońskie miasta Hiroszimę i Nagasaki, co przyspieszyło zakończenie wojny.

W czasie pracy nad projektem pojawił się w pomysł opracowania bomby wodorowej, czyli broni o jeszcze większej sile rażenia niż bomba atomowa. Bomba miała wykorzystać zjawisko fuzji nuklearnej. W czasie tej reakcji izotopy wodoru (najczęściej j deuter i tryt) łączą się pod wpływem bardzo wysokiej temperatury, tworząc hel w procesie fuzji nuklearnej. Przy tej reakcji powstaje niekontrolowana i samopodtrzymująca się reakcja łańcuchowa, której towarzyszy wyzwolenie olbrzymiej ilości energii.



Rys. 4. Amerykańska bomba wodorowa B53 o równoważniku trotylowym 9 MT [15]
Fig. 4. American B53 hydrogen bomb with a TNT equivalent of 9 MT[15]

Nad tym projektem, wtedy nazwanym „Super”, pracował znany fizyk, emigrant węgierski Edward Teller, który w trakcie ostatnich kilkunastu miesięcy istnienia Projektu Manhattan zajmował się tylko i wyłącznie tym tematem.

Po zakończeniu II wojny światowej wydawało się, że nie będzie potrzeby zbudowania bomby wodorowej. Dopiero pierwszy udany test broni jądrowej w wykonaniu Rosjan, w 1949 r., przekonał Amerykanów, iż istnieje potrzeba dokończenia tego projektu. Problem polegał na tym, że Teller oraz inni fizycy nie potrafili zaprojektować tego typu uzbrojenia. Przełomem okazały się dopiero rozwiązania polskiego matematyka, pracującego w USA współpracownika Tellera, Stanisława Ulama, dzięki czemu ostatecznie udało się stworzyć tą broń.

Ulam wpadł na pomysł, aby ukierunkować falę uderzeniową mechanicznego wybuchu jądrowego w celu skompresowania paliwa fuzyjnego. Zalety tego rozwiązania szybko dostrzegł Teller, a niedługo później wykorzystał je do zbudowania działającego ładunku termojądrowego, który dziś jest często opisywany mianem „konstrukcji Tellera-Ulama”.

2. Reaktory fuzyjne

Badania nad reaktorami fuzyjnymi rozpoczęły się w latach 40. XX wieku.

Fuzja jądrowa to potencjalna metoda wytwarzania energii elektrycznej z ciepła uwalnianego w reakcjach syntezy jądrowej.

Reaktor fuzyjny to urządzenie, które ma na celu kontrolowane wytwarzanie energii poprzez syntezę (fuzję) lekkich jąder atomowych izotopów wodoru (deuteru i trytu) w cięższe jądra

(helu), naśladując procesy zachodzące w Słońcu i innych gwiazdach.

W wyniku reakcji egzotermicznej powstającej w gwieździe wydzielona energia (w postaci energii kinetycznej produktów i promieniowania gamma), zostaje rozproszona na otaczających atomach i przekształca się na energię słoneczną i ciepłą.

Obecny świat stara się obecnie szybko dekarbonizować i przyspieszyć przejście od paliw kopalnych, które zużywają ogromne ilości energii, na rzecz odnawialnych źródeł energii, takich jak energia słoneczna, wiatrowa i wodna. Źródła te w sytuacjach braku słońca i wiatru nie zapewniają żadnych dostaw energii. Niektóre kraje stawiają na energię pochodzącą z rozszczepienia jądrowego, która jest niskoemisyjna, ale wiąże się z niewielkim, choć nie pomijalnym, ryzykiem katastrofy, problemami ze składowaniem odpadów radioaktywnych i wysokimi kosztami.

W przeciwieństwie do obecnie stosowanej energii pochodzącej z rozszczepienia jądrowego, fuzja jądrowa nie wytwarza odpadów radioaktywnych, co oznacza, że może być pierwszym krokiem w kierunku zmniejszenia naszej zależności od paliw kopalnych i stworzenia nieograniczonego, czystego źródła energii w czasach, gdy ludzkość mierzy się z kryzysem klimatycznym.

Wykorzystanie energii syntezy jądrowej w warunkach ziemskich dałoby olbrzymią ilość energii. Energia wytwor-

zona w ten sposób powinna minimalnie wpływać na środowisko. Ocenia się, że jeden gram mieszanki paliwowej deuteru i trytu w procesie syntezy jądrowej wytwarza 90 000 kilowatogodzin energii, czyli równowartość 11 ton węgla. Elektrownia węglowa o mocy 1000 MW wymaga niemal 3 milionów ton węgla rocznie. Elektrownia fuzyjna o tej samej mocy potrzebuje do tego jedynie 125 kg deuteru i 125 kg trytu.

Deuter można pozyskiwać ze wszystkich form wody, jest uzyskiwany przy produkcji „ciężkiej wody.” Tryt znacznie trudniej znaleźć w naturze. Rzadkość występowania trytu wynika z jego krótkiego okresu rozpadu połowicznego. Ten radioaktywny izotop wodoru powstaje w naturze tylko w górnych warstwach atmosfery w niewielkich ilościach. Tryt można jednak wytwarzać w samym reaktorze fuzyjnym. Izotop ten powstaje w wyniku kontaktu neutronów uciekających, z wytworzonej w reaktorze plazmy, z litem tworzącym wewnętrzną osłonę reaktora.

3. Zasada działania

Proces syntezy wymaga ekstremalnych warunków, aby pokonać siły elektrostatycznego odpychania między dodatnio naładowanymi jądrami. Wymagane warunki to:

Ekstremalna temperatura. Paliwo musi być podgrzane w komorze urządzenia do temperatury rzędu 100 milionów stopni Celsjusza (ponad sześciokrotnie więcej niż temperatura jądra Słońca), przechodząc w stan skupienia zwany plazmą (zjonizowany gaz składający się z wolnych elektronów i jąder atomowych).

Odpowiednie ciśnienie i uwięzienie. Plazma musi być utrzymywana z dala od ścian reaktora przez wystarczająco długi czas, aby nie zniszczyć materiału komory.

Reakcje termojądrowe zachodzą w wyniku zbliżenia się jąder na odległość odpowiadającą zasięgowi sił jądrowych (ok. 1 fm), co jest możliwe po pokonaniu elektrostatycznej bariery kulombowskiej wzajemnego odpychania jąder; reakcje termojądrowe mogą więc zachodzić albo przy dużej energii zderzających się jąder, co odpowiada temperaturze rzędu 10⁸ milionów stopni K, albo przy zniekształceniu bariery kulombowskiej (np. zwężeniu, występującym pod olbrzymim ciśnieniem panującym w gwiazdach, gdy gęstość materii przekracza 10⁴ g/cm³).

Na Ziemi, ze względu na brak potężnego pola grawitacyjnego występującego w gwiazdach, stosuje się głównie dwie metody syntezy jąder:

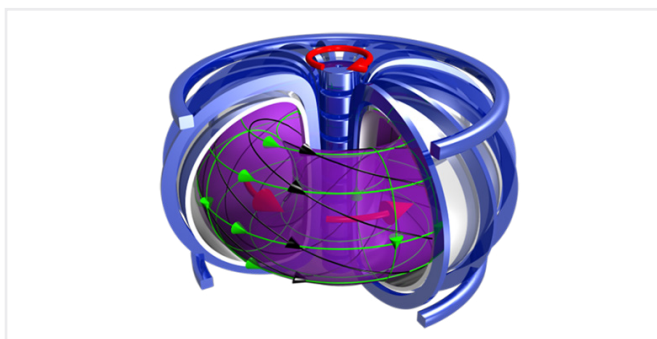
1. Magnetyczne uwięzienie (magnetic confinement fusion, MCF),
2. Inercyjne uwięzienie (inertial confinement fusion, ICF).

4. Magnetyczne uwięzienie

W metodzie magnetycznego uwięzienia (MCF) wykorzystuje się silne pola magnetyczne w urządzeniach nazywanych tokamakami lub stellaratorami. Urządzenia wykorzystują silny prąd elektryczny do rozbicia izotopów wodoru, deuteru i trytu umieszczonych w komorze reaktora odrywając elektrony od jąder i tworząc plazmę



Rys. 5. Widok komory reaktora fuzyjnego [5]
Fig. 5. View of the fusion reactor chamber [5]



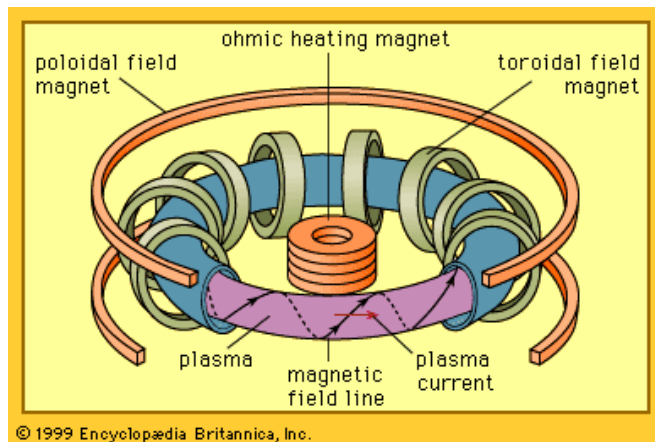
Rys. 7. Zasada działania tokamaka. Plazma jest skupiona w centralnej części komory w kształcie pierścienia (obwarzanka), która jest nazywana torusem. Cewki nadprzewodnikowe generują pole magnetyczne, pod wpływem którego cząstki naładowane plazmy krążą po okręgach, nie dotykając ścian komory [5]
Fig. 7. The operating principle of a tokamak. Plasma is concentrated in the central part of a ring-shaped chamber, called a torus. Superconducting coils generate a magnetic field, which causes the charged plasma particles to circulate in circles without touching the chamber walls [5]

— gorący, naładowany elektrycznie gaz. W plazmie elektrony są odrywane od atomów. Atom, w którym nie ma elektronów krążących wokół jądra, nazywany jest zjonizowanym i nosi nazwę jonu. W rezultacie plazma składa się z jonów i swobodnych elektronów. Oba typy reaktorów wykorzystują fakt, że naładowane cząstki reagują na siły magnetyczne do kontrolowania i ograniczania wytworzonej plazmy w toroidalnej komorze reaktora. Silne magnesy w reaktorach utrzymują jony w miejscu. Reaktor utrzymuje tę plazmę, oddalając ją od powierzchni materiałów komory (które w przeciwnym razie uległyby zniszczeniu) za pomocą kombinacji pól magnetycznych o geometrii toroidalnej (kształt pączka).

Elektrony są również wiązane przez siły magnetyczne reaktorów. Siły magnetyczne nieustannie obracają cząstki w komorach reaktora, zapobiegając ich ucieczce z plazmy.

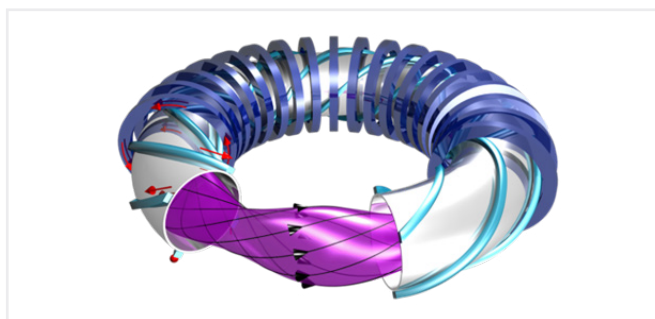
Główna komora ma kształt torusa. Dzięki działaniu elektromagnesów tworzony jest pierścień plazmy. Zmienne pole magnetyczne pochodzące z transformatora indukuje prąd elektryczny w pierścieniu gazu. Prąd ten powoduje wyładowania w gazie. Zachodzi jeszcze większa jego jonizacja i ogrzewanie. W końcu tworzy się gorąca plazma. Jest ona utrzymywana w zwartym słupie wewnątrz pierścienia dzięki silnemu polu magnetycznemu.

Gdy cząsteczki plazmy zostają pobudzone i zderzają się,



© 1999 Encyclopædia Britannica, Inc.

Rys. 6. Schemat tokamaka [5]
Fig. 6. Tokamak diagram [5]



Rys. 8. Konfiguracja układu magnetycznego typu Stellarator [5]
Fig. 8. Stellarator magnetic system configuration [5]

nagrzewają się, ostatecznie osiągając temperaturę od 100 do 300 milionów stopni Celsjusza. W tym momencie jądra wodoru są tak pobudzone, że mogą przewyższyć swoją naturalną tendencję do odpychania się, dzięki czemu mogą połączyć się, tworząc hel. W tym procesie uwalniają ogromne ilości energii. Utrzymanie stabilności plazmy w celu pozyskania energii jest trudne. Jest ona chaotyczna, supergorąca i podatna na turbulencje oraz inne niestabilności. Współczesna nauka wyjaśniła już wiele problemów wpływających na zachowanie plazmy.

Eksperymentalne tokamaki pracują od dziesięcioleci. Do tej pory jednak wymagały więcej energii do wytworzenia plazmy i jej krótkotrwałego podtrzymania niż generuje fuzja. Uważa się, że współcześnie budowane tokamaki pokonają w przyszłości to ograniczenie.

Pierwszy tokamak, T-1, rozpoczął działalność w Rosji w 1958 roku. Koncepcję tokamaka stworzyli w 1950 Igor Tamm i Andriej Sacharow. Tokamak (skrót od rosyjskich słów oznaczających „toroidalne uwięzienie magnetyczne”) został uruchomiony w Moskwie w połowie lat 60. XX wieku przez radzieckich fizyków plazmowych.

Kolejne postępy doprowadziły do budowy testowego reaktora syntezy jądrowej. Tokamaki w Princeton Plasma Physics Laboratory oraz Joint European Torus w Anglii osiągnęły rekordową moc syntezy jądrowej w latach 90. XX wieku. Te sukcesy zmotywowały 35 krajów do współpracy przy projekcie nadprzewodzącego tokamaka ITER, którego celem jest zbadanie fizyki spalania plazmy. ITER-International Thermonuclear Experimental Reactor, Międzynarodowy Eksperymentalny Reaktor Termojądrowy.

ITER to doświadczalny reaktor fuzyjny budowany w centrum badawczym Cadarache w pobliżu Marsylii, na południu Francji.

Konkurencyjne rozwiązanie w stosunku do tokamaka to stellarator (MS). Stellarator to toroidalne urządzenie do ograniczania pola magnetycznego, w którym transformacja obrotowa pola magnetycznego jest w głównej mierze spowodowana przez kształt zewnętrznych cewek pola magnetycznego. Rozwiązanie zapewnia takie zalety, jak zwiększona stabilność plazmy i możliwość jej utrzymania w stanie ustalonym przez dłuższy czas w porównaniu do tokamaków.

Skrećanie magnesów może nadać im kształt helisy (trójwymiarowa krzywa w kształcie skręconej sprężyny lub śruby) bez konieczności użycia transformatora – taki rodzaj konfiguracji nazywa się stellaratorem. (Zdjęcie: Instytut Fizyki Plazmy im. Maxa Plancka, Niemcy)

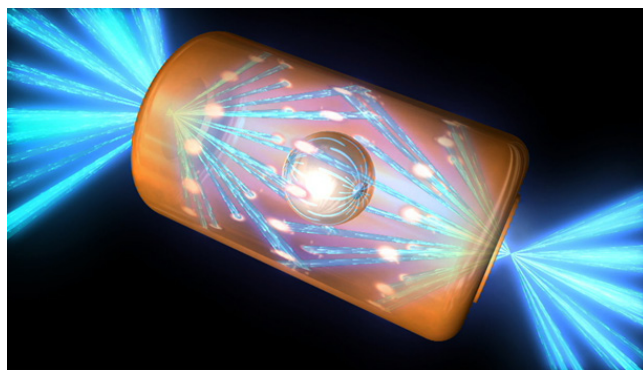
Podstawowa koncepcja fizyczna leżąca u podstaw układu magnetycznego stellaratora (MS) jest bardzo złożona, a wymagania dotyczące dokładności jej wdrożenia są bardziej rygorystyczne niż w przypadku tokamaków. Ponadto, przy tych samych objętościach plazmy, stellarator jest większy niż tokamak. Z tego powodu obecnie tokamak jest uważany za rozwiązanie lepsze, aczkolwiek stellarator ciągle jest traktowany jako jego poważne rozwiązanie konkurencyjne.

Stellaratory pracują bardziej stabilnie niż tokamaki i umożliwiają pracę ciągłą, podczas gdy tokamaki są lepsze w utrzymywaniu wysokiej temperatury plazmy, ale pracują w trybie impulsowym. Główna różnica polega na tym, że stellaratory używają skomplikowanych, zewnętrznych cewek magnetycznych do tworzenia pola w kształcie torusa, podczas gdy tokamaki wykorzystują większy prąd przepływający przez samą plazmę do stworzenia pola.

5. Fuzja inercyjna, Inertial confinement fusion, ICF

Jest to jedna z głównych, wykorzystywanych obecnie, metod produkcji energii z fuzji jądrowej.

Zasada działania ICF (rys. 9) polega na napromieniowaniu milimetrowej kulistej kapsuły wypełnionej deuterem i trytem (DT) promieniowaniem o bardzo dużej mocy przez kilka nanosekund przy pomocy wielu wiązek promieniowania laserowego. Jako paliwo wykorzystywane są izotopy wodoru: deuter i tryt. Odparowanie zewnętrznej powierzchni kapsuły spowodowane działaniem promienia lasera prowadzi do sprężenia paliwa deuter-tryt. To odparowanie powoduje ogromne ciśnienie wewnętrzne, które ściska paliwo do ekstremalnych gęstości i temperatur wywołując temperaturę (~100 milionów K) wystarczających do zainicjowania reakcji



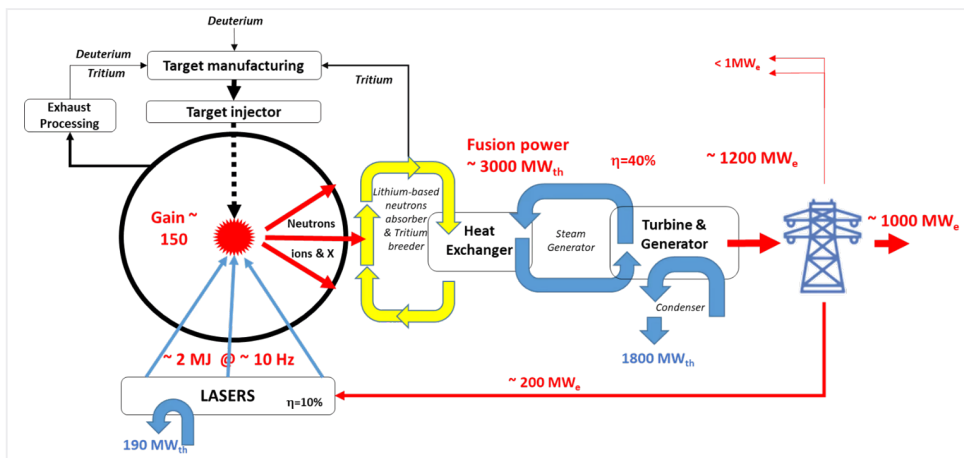
Rys. 9. Wizualizacja przedstawia tarczę National Ignition Facility wewnątrz kapsuły z nieprzezroczystego materiału do której przez otwory na obu końcach wpadają wiązki laserowe. Wiązki sprężają i podgrzewają kapsułę do warunków niezbędnych do zajścia syntezy jądrowej [3]

Fig. 9. The visualization shows the National Ignition Facility shield inside a capsule made of opaque material, with laser beams entering through holes at both ends. The beams compress and heat the capsule to the conditions necessary for nuclear fusion to occur[3]

syntezy jądrowej.

W przypadku paliwa DT większość energii uwalniana jest w postaci cząstek alfa i neutronów. W normalnych warunkach cząstki alfa mogą przemieszczać się przez paliwo na odległość około 10 mm, ale w warunkach ultragęstego sprężonego paliwa mogą one przemieszczać się na odległość około 0,01 mm, zanim ich ładunek elektryczny, oddziałując z otaczającą plazmą, spowoduje utratę prędkości. Większość energii uwalnianej przez cząstki alfa jest ponownie gromadzona w paliwie. Ten transfer energii kinetycznej podgrzewa otaczające cząstki do energii niezbędnej do syntezy jądrowej wywołując temperaturę (~100 milionów K) wystarczające do zainicjowania reakcji syntezy jądrowej.

Proces ten powoduje, że paliwo termojądrowe spala się w kierunku na zewnątrz od środka. Neutralne elektrycznie neutrony przemieszczają się na większe odległości w masie paliwa i nie przyczyniają się do procesu samonagrzewania. Wytworzone cząstki alfa są następnie ponownie absorbowane w plazmie, co dodatkowo podnosi jej temperaturę i wywołuje dużą reakcję syntezy jądrowej, która może zużyć znaczną część paliwa DT. Osiągnięcie tego



Rys. 10. Schemat działania elektrowni wykorzystującej metodę fuzji inercyjnej [3]

Fig. 10. Schematic diagram of the operation of a power plant using the inertial fusion method [3]

stanu spalania plazmy wymaga niezwykle symetrycznego napromieniowania i bardzo ścisłej tolerancji kapsuły.

Prowadzone eksperymenty nie umożliwiają wytwarzania energii w sposób ciągły, to tylko próby laboratoryjne. Według uproszczonego schematu działania przyszła elektrownia fuzyjna będzie działać zgodnie z zasadą przedstawioną na rys. 10.

Kapsuła wypełniona (około) jednym mg deuteru i trytu jest dostarczana do komory reakcyjnej, gdzie jest napromieniowywana równocześnie wieloma wiązkami laserowymi o energii megadżuli. Implozja kapsuły może doprowadzić do spalania nawet 30% DT, co prowadzi do uwolnienia ponad 100 MJ. Powtarzanie tego procesu wielokrotnie na sekundę spowoduje wygenerowanie średniej mocy rzędu gigawatów, głównie w postaci szybkich neutronów (14,3 MeV).

W przeciwieństwie do uwięzienia magnetycznego, metoda ta nie utrzymuje plazmy przez długi czas, ale używa inercji i gwałtownego impulsu do jej skompresowania.

Po osiągnięciu warunków fuzji, wydzielana jest energia w postaci energii kinetycznej produktów reakcji (głównie neutronów i jąder helu). Energia neutronów jest następnie pochłaniana przez tzw. „płaszcz” (ang. blanket) otaczający rdzeń reaktora, który się nagrzewa. Ciepło to może być wykorzystane do wytwarzania pary, napędzającej turbozespoły generatorów energii elektrycznej lub jako ciepło technologiczne w pewnych obszarach gospodarki.

6. Obecny stan rozwoju i wyzwania energetyki fuzyjnej

Obecnie reaktory fuzyjne wciąż są na etapie badawczym, a największym wyzwaniem pozostaje osiągnięcie dodatniego bilansu energetycznego (produkcja większej ilości energii niż zużywanej do podgrzania i utrzymania plazmy) w sposób ciągły i opłacalny ekonomicznie.

MAEA (Międzynarodowa Agencja Energii Atomowej) od lat odgrywa kluczową rolę w międzynarodowych badaniach nad syntezą jądrową. W 1960 roku MAEA uruchomiła czasopismo „Nuclear Fusion”, aby wymieniać się informacjami na temat postępów w dziedzinie syntezy jądrowej. Pierwsza międzynarodowa konferencja MAEA poświęcona energii syntezy jądrowej odbyła się w 1961 roku, a od 1974 roku MAEA organizuje konferencję co dwa lata, aby wspierać dyskusję na temat rozwoju i osiągnięć w tej dziedzinie.

7. Zalety energetyki fuzyjnej

Fuzja jądrowa uważana jest obecnie do najbardziej przyjaznych dla środowiska źródeł energii. Proces syntezy jądrowej nie powoduje emisji CO₂, innych szkodliwych gazów ani pyłów do atmosfery. Synteza jądrowa nie przyczynia się do emisji gazów cieplarnianych ani globalnego ocieplenia. Dwa źródła paliwa, wodór i lit, są powszechnie dostępne w wielu częściach świata i łatwe do pozyskania.

W wyniku przebiegu fuzji jądrowej nie powstają żadne długożyciowe odpady radioaktywne. Proces ten jest przeciwieństwem rozszczepienia jądrowego opartego na ura-

nie lub plutonie w wyniku którego powstają niestabilne jądra; niektóre z nich są radioaktywne przez tysiące lat emitując szkodliwe dla środowiska promieniowanie.

Reaktor termojądrowy produkuje hel, który jest gazem obojętnym. Produkuje również i zużywa tryt w elektrowni w obiegu zamkniętym. Tryt jest radioaktywny (emiter beta), ale jego okres półtrwania jest krótki. Jest on używany tylko w niewielkich ilościach, więc w przeciwieństwie do długożyciowych jąder radioaktywnych, nie może stanowić poważnego zagrożenia.

Produkcja energii z fuzji jądrowej nie opiera się na reakcji łańcuchowej, tak jak rozszczepienie. Aby zachodziła reakcja syntezy wytworzona plazma musi być utrzymywana w bardzo wysokiej temperaturze, wymagając zewnętrznych systemów grzewczych i musi być utrzymywana w zewnętrznym polu magnetycznym. Zmiana konfiguracji roboczej reaktora powoduje schłodzenie plazmy lub utratę jej szczelności. W przypadku powstania takiej sytuacji reaktor automatycznie zatrzymałby się w ciągu kilku sekund, ponieważ proces syntezy zostałby zatrzymany, bez żadnych skutków zewnętrznych. W świetle obecnej wiedzy reaktory fuzyjne są uważane z natury za bezpieczne.

8. Problemy energetyki fuzyjnej

Choć fuzja jest z natury bezpieczniejsza niż rozszczepienie jądrowe, nie jest całkowicie pozbawiona problemów. Neutrony wyzwolane w procesie fuzji mogą degradować materiały reaktora, zmniejszając ich wytrzymałość, powodując kruchość, itp. Z biegiem czasu neutrony mogą skutecznie napromieniować reaktor i otaczające go materiały. Proces ten zależy w dużej mierze od zastosowanych rozwiązań konstrukcyjnych i użytych materiałów. Dodatkowo, tryt, który jest lekko radioaktywnym paliwem, wymaga ostrożnego obchodzenia się z nim, aby nie powstały jego wycieki.

Zagadnienia te stanowią poważne wyzwania dla przyszłych eksperymentów z fuzją.

9. Prognozy dostępności energetyki fuzyjnej

Obecnie testowane laboratoryjnie urządzenia fuzyjne wytwarzają ponad dziesięć megawatów energii z fuzji ale przez bardzo krótki czas. Budowany ITER będzie w stanie wytworzyć 500 megawatów energii z fuzji. Chociaż jest to moc elektrowni zawodowych nadal istnieją pewne problemy technologiczne do rozwiązania, zanim komercyjna elektrownia będzie mogła działać.

Dostęp do komercyjnej energii fuzyjnej to nadal kwestia przyszłości, ale tempo postępu w tej dziedzinie zdecydowanie wzrosło w ostatnich latach. Optymistyczne prognozy sugerują, że pierwsze komercyjne reaktory termojądrowe mogą zacząć działać w latach 40. XXI wieku.

Prywatne firmy pracują nad bardziej kompaktowymi i wydajnymi rozwiązaniami, które mogą przyspieszyć wdrożenie tej technologii. Według ekspertów z tej branży w perspektywie średnioterminowej, czyli do 2050 roku, energia fuzyjna nie zastąpi paliw kopalnych ani odnawial-

nych źródeł energii, ponieważ wciąż pozostaje w fazie eksperymentalnej

10. Istniejące badawcze rozwiązania

Główne projekty badawcze to m.in.:

1. ITER

ITER to skrót od Międzynarodowego Eksperymentalnego Reaktora Termojądrowego (International Thermonuclear Experimental Reactor), czyli wielkoskalowego, międzynarodowego projektu badawczego, którego celem jest zbudowanie i uruchomienie reaktora fuzyjnego w celu sprawdzenia możliwości produkcji energii elektrycznej z kontrolowanej syntezy jądrowej. Projekt, którego realizacja odbywa się we Francji, jest jednym z najbardziej złożonych i kosztownych przedsięwzięć inżynierskich w historii.

ITER to powstający największy na świecie tokamak, mający na celu udowodnić, że fuzja jest opłacalna z naukowego i technicznego punktu widzenia (planowane pierwsze eksperymenty z plazmą w 2030 r., z D-T w 2035 r.).

Przy projektowaniu ITER przyjęto założenie że urządzenie w dużej skali stwarza większy potencjał dla reakcji syntezy jądrowej. Moc wyjściowa w takiej skali rośnie poprawiając zarazem wydajność urządzenia. Jeśli ITER będzie działał zgodnie z planem po osiągnięciu pełnej sprawności w 2035 roku, zużyje 50 megawatów mocy wejściowej, aby wygenerować 500 megawatów energii z syntezy jądrowej w postaci ciepła. Chociaż ITER nie będzie wykorzystywał tej energii do wytwarzania energii elektrycznej, ma on służyć jako doświadczalny model reaktora fuzyjnego w celu rozwiązania wielu problemów naukowych.

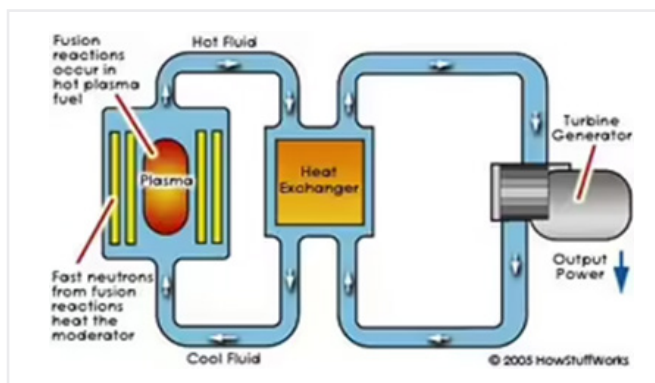
Reaktor fuzyjny będzie podgrzewał strumień paliwa deuterowo-trytowego, tworząc plazmę wysokotemperaturową. Moc potrzebna do rozpoczęcia reakcji syntezy jądrowej wyniesie około 70 megawatów, ale moc wyjściowa reakcji wyniesie około 500 megawatów. Reakcja syntezy jądrowej będzie trwała od 300 do 500 sekund. (Ostatecznie będzie to trwała reakcja syntezy jądrowej).

Koce litowe umieszczone na zewnątrz komory reakcji plazmowej będą absorbować wysokoenergetyczne neutrony z reakcji syntezy jądrowej, wytwarzając więcej paliwa trytowego. Koce będą się również nagrzewać pod wpływem neutronów.



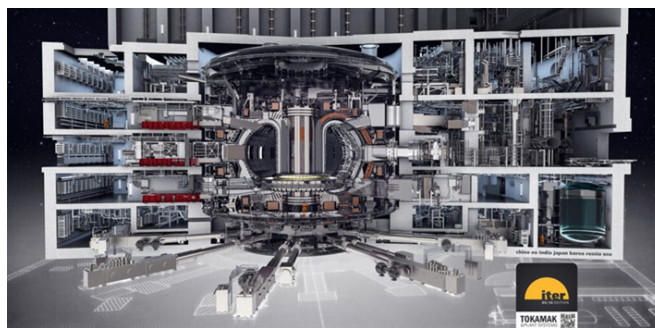
Rys. 11. ITER – widok z lotu ptaka [4]

Fig. 11. ITER – bird's eye view [4]



Rys. 12. Uproszczony schemat działania elektrowni ITER [4]

Fig. 12. Simplified diagram of the ITER power plant operation [4]



Rys. 13. Widok wnętrza reaktora ITER [4]

Fig. 13. Interior view of the ITER reactor [4]

Ciepło będzie przekazywane przez pętlę chłodzenia wodnego do wymiennika ciepła w celu wytworzenia pary.

Para będzie napędzać turbiny elektryczne produkujące energię elektryczną.

Para wodna zostanie skroplona i zamieniona w wodę, co pozwoli na pochłonięcie większej ilości ciepła z reaktora w wymienniku ciepła.

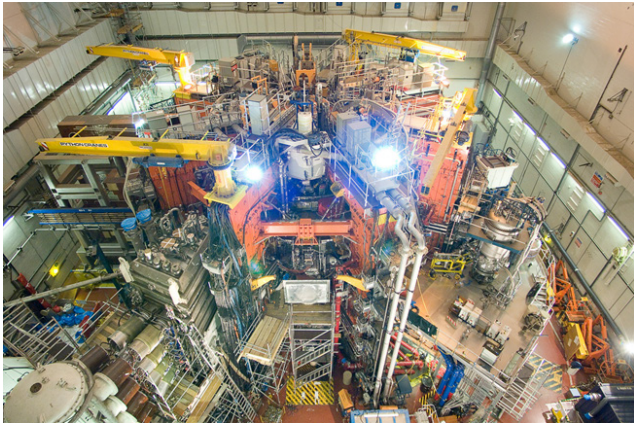
Tokamak ITER początkowo będzie służył do testowania wykonalności reaktora termojądrowego, a ostatecznie stanie się testową elektrownią termojądrową.

2. JET

JET (Joint European Torus) w Wielkiej Brytanii to największy działający tokamak, na którym w lutym 2022 r. osiągnięto rekordową energię 59 megadżuli z fuzji w ciągu 5 sekund.

Tokamak JET to eksperymentalny reaktor termojądrowy w kształcie torusa, położony w Culham Center for Fusion Energy w Oxfordshire w Wielkiej Brytanii. Obiekt wykorzystuje pola magnetyczne utrzymujące gorący, zjonizowany gaz (plazmę) z dala od wewnętrznej ściany zbiornika, umożliwiając bezpieczną pracę w temperaturze 150 milionów stopni dziesięciokrotnie wyższej niż temperatura w jądrze słońca.

Rdzeniem reaktora jest komora próżniowa, w której plazma termojądrowa jest utrzymywana za pomocą silnych pól magnetycznych. W obecnej konfiguracji główny i mniejszy promień torusa plazmowego wynoszą odpowiednio 3 i 0,9 metra, a całkowita objętość plazmy wynosi 90 metrów sześciennych. Divertor zlokalizowany na dnie komory próżniowej umożliwia kontrolowane odprowadzanie uciekającego ciepła i gazu.



Rys. 14. Widok hali z tokamakiem JET [3]

Fig. 14. View of the hall with the JET tokamak [3]

3. NIF

NIF (National Ignition Facility) w USA. Jet to placówka badawcza wykorzystująca inercyjne uwięzienie, gdzie po raz pierwszy udało się osiągnąć naukowy próg zapłonu (więcej energii z fuzji niż dostarczono do paliwa).

4. EAST

EAST w Chinach i KSTAR w Korei Południowej to tokamaki, które ustanowiły rekordy w długości trwania stabilnej plazmy.

5. CFS

CFS (Commonwealth Fusion Systems) to firma, która ogłosiła plany budowy niedaleko Richmond w stanie Wirginia pierwszej na świecie elektrowni fuzyjnej na skalę sieciową. CFS wybrało teren w hrabstwie Chesterfield w Wirginii jako miejsce budowy elektrowni typu ARC (skrót od Affordable, Robust, Compact – przystępny cenowo, wytrzymały, kompaktowy). Celem tej elektrowni fuzyjnej jest wytwarzanie, do wczesnych lat 30. XXI wieku 400 megawatów czystej, praktycznie nieograniczonej energii.

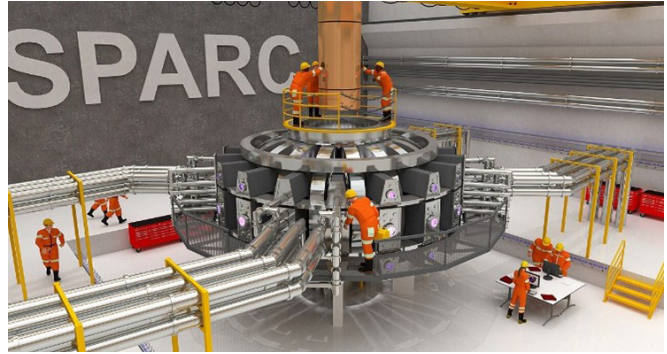
Reaktor o nazwie SPARC będzie wykorzystywał zupełnie nowy system wysokotemperaturowych magnesów nadprzewodzących zaprojektowanych przez CFS, aby utrzymać supergorącą plazmę w temperaturze ponad 100 milionów °C. Ma to być reaktor typu tokamak.

6. WEST and EAST

Zespoły badawcze z Chin i Francji osiągnęły rekordowe czasy stabilnych stanów plazmy w stanowiskach fuzyjnych. Reaktor EAST (Experimental Advanced Superconducting Tokamak – eksperymentalny nadprzewodzący tokamak) opracowany przez Instytut Fizyki Plazmy Chińskiej Akademii Nauk, w styczniu 2025 r. utrzymał stałą pracę plazmy o wysokim ograniczeniu przez 1066 sekund.

W ramach projektu „Wolfram Environment in Stead-state Tokamak”, (stanowisko WEST, projekt francuski) uzyskano czas stałej pracy plazmy wynoszący 1337 sekund pobijając chiński rekord sprzed kilku tygodni. Utrzymanie plazmy, która z natury jest niestabilna, jest jednym z największych problemów w fuzji jądrowej.

WEST jest wyjątkowy wśród europejskich tokamaków dzięki nadprzewodzącym magnesom, które umożliwiają długie czasy utrzymywania. Ten doskonały wynik pozwoli określić kierunki rozwojowe dla przyszłego wykorzysta-



Rys. 15. Wizualizacja proponowanego eksperymentu z tokamakiem SPARC [14]

Fig. 15. Visualization of the proposed SPARC tokamak experiment [14]

nia ITER w którym w przyszłej dekadzie ma być sprawdzona możliwość wielkoskalowej produkcji energii z fuzji jądrowej.

Literatura

- [1] Komisja Europejska, Dyrekcja Generalna ds. Badań Naukowych. (2007). Badania nad syntezą jądrową: Opcja energetyczna dla przyszłości Europy. Raport instytucjonalny UE, ISBN 9279005138.
- [2] Cook, I., Marbach, G., Di Pace, L., Girard, C., & Taylor, N. P. (2001, kwiecień). Bezpieczeństwo i wpływ fuzji na środowisko (Raport EUR (01) CCE-FU / FTC 8/5).
- [3] National Ignition Facility. (b.r.). National Ignition Facility. Dostęp online: <https://lasers.llnl.gov> (brak daty dostępu).
- [4] Global Society. (b.r.). Nuclear fusion – a sustainable energy revolution: 2027 vision. Dostęp online: <https://www.globalsociety.earth/post/nuclear-fusion-a-sustainable-energy-revolution-2027-vision>
- [5] Fusion Energy Sciences (FES), Biuro Naukowe Departamentu Energii USA. (b.r.). Fusion Energy Sciences. Dostęp online:
- [6] Kramarek, W., & Sałaciński, T. (2013). Podstawowe zagadnienia bezpieczeństwa elektrowni jądrowej. Przegląd Techniczny, nr 24–25/2013, s. 20–30.
- [7] Kramarek, W. (2016, styczeń). Warunki bezpiecznej pracy elektrowni jądrowej. Mechanik. <https://doi.org/10.17814/mechanik.2016.2.16>
- [8] U.S. Nuclear Regulatory Commission. (b.r.). Reading Room. Dostęp online: <http://www.nrc.gov/reading>
- [9] European Nuclear Society. (b.r.). Pebble bed reactor. Dostęp online: <http://www.euronuclear.org/info/encyclopedia/p/pebble.htm>
- [10] Wikipedia. (b.r.). Industrial safety systems. Dostęp online: http://en.wikipedia.org/wiki/Industrial_safety_systems
- [11] World Nuclear Association. (b.r.). Nuclear power reactors. Dostęp online: <https://world-nuclear.org/information-library/nuclear-fuel-cycle/nuclear-power-reactors/nuclear-power-reactors>
- [12] Wikipedia. (b.r.). Wybuch jądrowy. Dostęp online: https://pl.wikipedia.org/wiki/Wybuch_j%C4%85drowy
- [13] Wikipedia. (b.r.). Broń jądrowa. Dostęp online: https://pl.wikipedia.org/wiki/Bro%C5%84_j%C4%85drowa
- [14] Wikipedia. (b.r.). SPARC (tokamak). Dostęp online: [https://en.wikipedia.org/wiki/SPARC_\(tokamak\)#/media/File:Sparc](https://en.wikipedia.org/wiki/SPARC_(tokamak)#/media/File:Sparc)
- [15] Wikipedia. (b.r.). Ładunek termojądrowy. Dostęp online: https://pl.wikipedia.org/wiki/%C5%81adunek_termoj%C4%85drowy

Polskie Zrzeszenie Inżynierów i Techników Sanitarnych – zakres i formy działalności

Polskie Zrzeszenie Inżynierów i Techników Sanitarnych jest niezależną, dobrowolną organizacją naukowo-techniczną o ogólnopolskim zasięgu, działającą nieprzerwanie od 1919 r. Organizacja funkcjonuje na terytorium Rzeczypospolitej Polskiej, a siedziba jej władz naczelnych mieści się w Warszawie. PZITS skupia osoby fizyczne i prawne związane zawodowo i społecznie z inżynierią sanitarną oraz inżynierią środowiska, obejmując szerokie spektrum specjalizacji technicznych.

Działalność PZITS koncentruje się na rozwoju myśli technicznej oraz upowszechnianiu wiedzy w obszarach takich jak gazownictwo, wodociągi i kanalizacja, ogrzewnictwo, ciepłownictwo, wentylacja i klimatyzacja, a także ochrona środowiska, gospodarka odpadami i budownictwo hydrotechniczne. Istotnym elementem aktywności jest integracja środowiska inżynierskiego, podnoszenie oraz weryfikacja kwalifikacji zawodowych, a także dbałość o przestrzeganie zasad etyki zawodowej i reprezentowanie zbiorowych interesów członków wobec instytucji publicznych.

Realizacja celów statutowych odbywa się poprzez szeroką działalność naukowo-techniczną, edukacyjną i wydawniczą. PZITS organizuje konferencje, seminaria, sympozja, szkolenia oraz wyjazdy studialne, a także prowadzi działalność wydawniczą, obejmującą czasopisma techniczne i publikacje branżowe. W ramach struktur organizacyjnych funkcjonują oddziały regionalne, koła, sekcje branżowe i komisje problemowe, co umożliwia prowadzenie działań dostosowanych do potrzeb lokalnych środowisk technicznych.

Znaczącym obszarem aktywności jest współpraca z administracją publiczną, samorządami, jednostkami gospodarczymi i naukowymi, w tym udział w opiniowaniu aktów prawnych oraz norm technicznych. Organizacja prowadzi również doradztwo techniczne i rzeczoznawstwo, wspiera rozwój innowacyjnych rozwiązań oraz działania edukacyjne skierowane do różnych grup odbiorców. PZITS, odpowiadając na wyzwania technologiczne i środowiskowe, ukierunkowuje swoje działania na rozwój kompetencji inżynierskich, wdrażanie nowoczesnych technologii oraz wzmacnianie współpracy pomiędzy nauką, przemysłem i administracją.



Relacja z Konferencji „Instalacje w obiektach obrony cywilnej”

Polskie Zrzeszenie Inżynierów i Techników Sanitarnych – Oddział Katowicki zorganizowało konferencję „Instalacje w obiektach obrony cywilnej”, która odbyła się w Bibliotece Śląskiej w Katowicach. Wydarzenie poświęcone było analizie wymagań oraz rozwiązań związanych z instalacjami sanitarnymi i technicznymi w obiektach przeznaczonych do ochrony ludności, ze szczególnym uwzględnieniem specyfiki tych konstrukcji i potrzeb branży technicznej.

Konferencja objęła szeroki zakres zagadnień dotyczących projektowania, instalacji oraz funkcjonowania instalacji w obiektach obrony cywilnej, a także sposobów ich dostosowania do wymogów bezpieczeństwa. Uczestnicy mieli możliwość zapoznania się z propozycjami koncepcji technicznych oraz dobrych praktyk, co pozwoliło na pogłębioną refleksję nad wyzwaniami stawianymi przed inżynierami sanitarnymi i technicznymi w tym obszarze działalności.

Organizacja tej konferencji stanowi przykład zaangażowania PZITS w inicjatywy służące wymianie wiedzy oraz kompetencji środowiska technicznego. Poprzez taką działalność PZITS wspiera rozwój standardów branżowych oraz ułatwia praktyczne spojrzenie na kluczowe kwestie związane z instalacjami w obiektach o podwyższonym poziomie odpowiedzialności technicznej.

Więcej informacji: <https://pzits.com.pl/index.php/aktualnosci/538-instalacje-w-obiektach-ochrony-cywilnej-wymaganie-propozycje-rozwiazan>



Szkolenie z zakresu zgrzewania rur z tworzyw sztucznych

W dniach 25–27 lutego 2026 r. odbędzie się specjalistyczne szkolenie „Zgrzewanie doczołowe i elektrooporowe rur z tworzyw sztucznych”, organizowane przez Polskie Zrzeszenie Inżynierów i Techników Sanitarnych – Oddział Dolnośląski.

Program obejmuje metody zgrzewania stosowane w sieciach i instalacjach sanitarnych, wykorzystanie nowoczesnych technologii i narzędzi, zasady prawidłowego wykonywania zgrzewów oraz aktualne wymagania normowe i przepisy techniczne. Zajęcia prowadzone będą w formule łączącej część teoretyczną z intensywnymi ćwiczeniami praktycznymi.

Po ukończeniu szkolenia uczestnicy otrzymają certyfikat potwierdzający udział i nabyte kompetencje.

Szczegóły i zapisy: <https://www.pzits.not.pl/zgrzew.html>



Szkolenia branżowe – informacja patronacka

W ramach partnerstwa z Branżowym Centrum Umiejętności w Żywcu przekazujemy informacje o aktualnej ofercie szkoleń kierowanych do osób dorosłych, zainteresowanych podnoszeniem kwalifikacji w obszarze instalacji sanitarnych, grzewczych i gazowych.

Zakres szkoleń obejmuje zagadnienia związane z wykonawstwem, montażem i obsługą instalacji technicznych w budownictwie, a także wybrane elementy nowoczesnych technologii stosowanych w praktyce instalacyjnej. Programy mają charakter praktyczno-teoretyczny i realizowane są w formule zajęć stacjonarnych, z wykorzystaniem zaplecza technicznego i dydaktycznego ośrodka.

Oferta szkoleniowa obejmuje kursy odpowiadające na potrzeby osób aktywnych zawodowo, które chcą uzupełnić wiedzę, zdobyć nowe umiejętności praktyczne lub uporządkować kompetencje w zakresie instalacji sanitarnych i systemów technicznych budynków. Tematyka szkoleń jest zróżnicowana i dostosowana do aktualnych rozwiązań stosowanych w branży, a programy realizowane są w ramach zaplanowanych edycji szkoleniowych.

Informacje o aktualnych szkoleniach, ich zakresie tematycznym, terminach oraz zasadach udziału publikowane są na stronie Branżowego Centrum Umiejętności w Żywcu: <https://bcu.zsbd.edu.pl/szkolenia>

Konferencja naukowo-techniczna „Woda, Ścieki, Odpady – Infrastruktura i Technologia”

Z przyjemnością ogłaszamy, że jesteśmy Patronem Konferencji organizowanej przez Katedrę Gospodarki Wodno-Ściekowej i Technologii Odpadów (Wydział Inżynierii Środowiska, Politechnika Wrocławska) pod tytułem „Woda, Ścieki, Odpady – Infrastruktura i Technologia”. Wydarzenie odbędzie się w dniach 20 – 22 maja 2026 r. w hotelu Hotel Trzebnica, ul. Leśna 2, 55-100 Trzebnica. Konferencja stanowi forum wymiany wiedzy i doświadczeń pomiędzy środowiskiem naukowym, projektowym, eksploatacyjnym oraz przedstawicielami administracji i sektora komunalnego, działającymi w obszarze inżynierii środowiska.

Zakres tematyczny konferencji koncentruje się na zagadnieniach związanych z gospodarką wodną, ściekową i odpadową, ze szczególnym uwzględnieniem infrastruktury technicznej oraz stosowanych technologii. Program obejmuje m.in. technologie uzdatniania wody i oczyszczania ścieków, projektowanie, modernizację i eksploatację systemów infrastruktury komunalnej, zagadnienia niezawodności i bezpieczeństwa obiektów technicznych oraz rozwiązania technologiczne stosowane w gospodarce odpadami. Konferencja łączy aspekty naukowe z praktyką inżynierską, umożliwiając prezentację aktualnych kierunków rozwoju i doświadczeń wdrożeniowych.

Zgodnie z kalendarium wydarzenia, rejestracja uczestników prowadzona jest do 15 lutego 2026 r. i odbywa się za pośrednictwem formularza rejestracyjnego.

Szczegółowe informacje dotyczące konferencji dostępne są na stronie: <https://wso.pwr.edu.pl/konferencja>



Zostań członkiem Polskiego Zrzeszenia Inżynierów i Techników Sanitarnych



POLSKIE ZRZESZENIE
INŻYNIERÓW I TECHNIKÓW
SANITARNYCH

Członkostwo w PZITS umożliwia:



Otrzymywanie:

- zaproszeń na seminaria, konferencje i szkolenia organizowane przez PZITS,
- dostępu do nagrań z wydarzeń organizowanych przez Zarząd Główny PZITS,
- zaproszeń do udziału w wycieczkach technicznych oraz spotkaniach integracyjnych,
- bieżących informacji o zmianach w przepisach i legislacji branżowej,
- informacji o ofertach pracy w branży.

Możliwość:

- Udziału w opracowywaniu przepisów oraz zgłaszania propozycji zmian w obowiązujących regulacjach,
- nawiązywania bezpośrednich kontaktów z ekspertami i przedstawicielami branży,
- uzyskiwania porad i opinii w sprawach technicznych związanych z zakresem działalności PZITS,
- współpracy i wymiany doświadczeń z organizacjami zrzeszonymi m.in. w REHVA i IGU,
- publikowania artykułów w czasopismach PZITS,
- aktywnego udziału w pracach sekcji branżowych,
- otrzymania odznaczeń honorowych PZITS.



Dostęp do:

- materiałów, poradników i wytycznych opracowywanych przez PZITS,
- działalności szkoleniowej i rozwojowej organizowanej w całej Polsce,
- stowarzyszeniowej wspólnoty i wsparcia środowiska inżynierskiego.

Kim jesteśmy?

PZITS to ogólnopolska organizacja skupiająca ok. 3 200 techników, inżynierów i naukowców działających w obszarze inżynierii sanitarnej i środowiska. Misją PZITS jest działalność na rzecz społeczeństwa poprzez rozwój rozwiązań technicznych służących ochronie zdrowia i środowiska naturalnego. PZITS jest jedynym polskim członkiem REHVA oraz International Gas Union, co umożliwia aktywną współpracę międzynarodową. Członkowie PZITS uczestniczą w pracach zespołów opiniujących prawo budowlane i przepisy techniczno-budowlane oraz działają w Organach Technicznych Polskiego Komitetu Normalizacyjnego.



Więcej szczegółów:
www.pzits.pl/czlonkostwo