



**POLSKIE ZRZESZENIE
INŻYNIERÓW I TECHNIKÓW
SANITARNYCH**

CZASOPISMO WYDAWANE OD 1921 ROKU

Gaz Woda i Technika Sanitarna

Gas Water & Sanitary Engineering

2

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

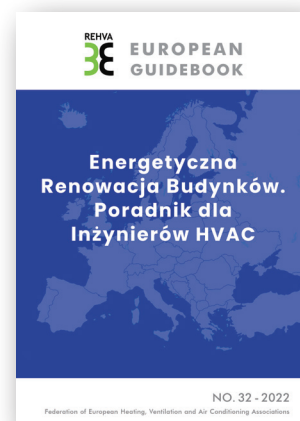
1

2026

www.gwits.pl

cena: 18,50 zł (w tym VAT 8%)

Zapisz się na **bezpłatną** prenumeratę
czasopism, a otrzymasz 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 Kwestar – Politechnika Warszawska

dr inż. Piotr Manczarski – Politechnika Warszawska

dr hab. inż. Jerzy Mikosz – Politechnika Krakowska

dr Grzegorz Roślonek – 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 – Bio-Energo-Gaz

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 02/2026

Nakład: 210 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. Licencjodawcą jest PZITS.

PRZESYŁANIE ARTYKUŁÓW / Submission

Przesyłanie artykułów i wytyczne dla autorów / Article submission and author guidelines www.gwits.pl

SPIS TREŚCI / Contents

Piotr Krośnicki

Analiza porównawcza metod magazynowania energii

Comparative Analysis of Energy Storage Methods.....2

Maciej Dańczak, Agnieszka Sobianowska-Turek

Techniki elektrowydzielania w odzysku surowców krytycznych z odpadów elektrycznych i elektronicznych – przegląd i analiza literatury

Electrodeposition techniques for the recovery of critical raw materials from electrical and electronic waste – review and literature analysis8

Katarzyna Umiejewska, Maciej Malarski, Katarzyna Miszta-Kruk, Piotr Hładki, Monika Żubrowska-Sudoł

Wody opadowe i ścieki szare – potencjał ponownego wykorzystania w budynkach

Rainwater and greywater – the potential for reuse in buildings13

Witold Paleczek

Zmarzlina suwalska i klatraty metanu jako klucz do genezy biegunowych czap lodowych

The Suwałki permafrost and methane clathrates as a key to the genesis of polar ice caps17

Andrzej J. Osiadacz, Łukasz Kotyński, Maciej Chaczykowski

SimNet SSWater – program do symulacji statycznej sieci wodociągowych

SimNet SSWater – a program for steady state simulation water supply networks.....23

Grzegorz Roślonek

Czy LNG powstało w Polsce?

LNG was invented in Poland?29

PZITS w działaniu 34

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

All published manuscripts are available online in Open Access:

www.gwits.plfacebook.com/GazWodalinkedin.com/company/gazwoda/

Analiza porównawcza metod magazynowania energii

Comparative Analysis of Energy Storage Methods

Piotr Krośnicki^{1*} ¹ Wydział Inżynierii i Ekonomii, Państwowa Akademia Nauk Stosowanych im. Ignacego Mościckiego w Ciechanowie* Kontakt / Correspondence: piotrekpiotrek03@wp.pl**Streszczenie:**

W niniejszym artykule przedstawiono analizę porównawczą różnych metod magazynowania energii. Uwzględniono aspekty technologiczne, ekonomiczne, środowiskowe oraz efektywność energetyczną wybranych systemów magazynowania energii, takich jak: magazyny ciepła, akumulatory elektrochemiczne, superkondensatory, magazyny sprężonego powietrza, magazynowanie wodoru oraz elektrownie szczytowo-pompowe. Na podstawie przeprowadzonych analiz opisano zalety i wady, a także perspektywy rozwoju wybranych technologii w kontekście transformacji energetycznej.

Słowa kluczowe: magazynowanie energii, energia, akumulatory, wodór, efektywność energetyczna, transformacja energetyczna, metody magazynowania energii, koszty energii

Abstract:

In this article, a comparative analysis of various energy storage methods is presented. Technological, economic, environmental aspects, as well as the energy efficiency of selected energy storage systems such as thermal storage, electrochemical batteries, supercapacitors, compressed air energy storage, hydrogen storage, and pumped-storage power plants are analysed. Based on the conducted analyses, the advantages and disadvantages, as well as the development prospects of the selected technologies in the context of the energy transition are described.

Keywords: energy storage, energy, batteries, hydrogen, energy efficiency, energy transition, energy storage methods, energy cost

1. Wstęp

Współczesna energetyka stoi przed ogromnymi wyzwaniami związanymi z koniecznością ograniczenia emisji gazów cieplarnianych, poprawą środowiska naturalnego, zwiększenia udziału odnawialnych źródeł energii (OZE) oraz zapewnienia stabilności dostaw energii elektrycznej i ciepłej. Dynamiczny rozwój źródeł rozproszonych takich jak fotowoltaika czy farmy wiatrowe wymaga elastycznych mechanizmów bilansowania popytu i podaży. W tym kontekście magazynowanie energii staje się nieodzownym elementem nowoczesnych systemów energetycznych.

Celem niniejszego artykułu jest analiza porównawcza metod magazynowania energii z punktu widzenia ich zastosowań, sprawności, kosztów, skalowalności oraz integracji z systemami energetycznymi. Uwzględniono zarówno technologie magazynowania energii cieplnej jak i energii elektrycznej. Szczególną uwagę poświęcono możliwościom wykorzystania tych technologii w kontekście transformacji energetycznej i rozwoju gospodarki niskoemisyjnej. Przedstawiona analiza opiera się na przeglądzie

literatury, danych technologicznych i ekonomicznych, a także przykładach wdrożeń i scenariuszach rozwoju rynku magazynowania energii.

2. Termiczne metody magazynowania energii

Termiczne metody magazynowania energii odgrywają kluczową rolę w zwiększaniu efektywności systemów energetycznych, szczególnie w kontekście wykorzystania odnawialnych źródeł energii [3]. Do podstawowych mechanizmów należą magazynowanie ciepła jawnego (sensownego), ciepła utajonego oraz magazynowanie w reakcjach chemicznych.

Techniki te pozwalają na przechowywanie nadmiaru ciepła i jego wykorzystanie w okresach zwiększonego zapotrzebowania. Omówiono najważniejsze technologie, ich charakterystyki, zastosowania, zalety i ograniczenia.

Wśród metod termicznych wyróżniamy m.in.:

- magazynowanie ciepła w zbiornikach wodnych,
- gruntowe magazyny ciepła,

- wykorzystanie materiałów zmiennofazowych (PCM),
- magazyny z reakcjami sorpcyjnymi i chemicznymi.

Czynnikiem determinującym rozwój tych metod jest przede wszystkim konieczność zwiększenia stabilności dostaw ciepła oraz redukcji emisji gazów cieplarnianych.

2.1. Długoterminowe i krótkoterminowe magazynowanie ciepła

Długoterminowe i krótkoterminowe magazynowanie ciepła to dwa podstawowe podejścia wykorzystywane w systemach termicznych [3]. Kluczowym kryterium rozróżniającym jest czas przechowywania energii – krótkoterminowe systemy operują zazwyczaj w cyklu dobowym lub tygodniowym, natomiast długoterminowe umożliwiają przechowywanie energii przez okresy sezonowe.

Długoterminowe magazyny ciepła (Seasonal Thermal Energy Storage – STES) gromadzą nadwyżki energii cieplnej, głównie z OZE, w okresie letnim, by wykorzystać je zimą. W tej kategorii wyróżniamy technologie takie jak:

- ATES (Aquifer Thermal Energy Storage) – magazynowanie w warstwach wodonośnych,
- BTES (Borehole Thermal Energy Storage) – akumulacja w gruncie,
- CTES (Cavern or Tank Thermal Energy Storage) – magazynowanie w dużych zbiornikach podziemnych.

Krótkoterminowe magazyny ciepła służą do bilansowania zapotrzebowania na ciepło w cyklu dobowym. Przykładem mogą być zasobniki ciepłej wody użytkowej (CWU) współpracujące z kolektorami słonecznymi czy pompami ciepła.

Efektywność każdego typu magazynu zależy od:

- izolacji termicznej,
- pojemności cieplnej medium,
- strat ciepła,
- sprawności cyklu ładowania/rozładowania.

Długoterminowe magazynowanie pozwala na znaczną redukcję zużycia paliw kopalnych, poprawę jakości powietrza i zwiększenie udziału OZE w bilansie cieplnym. Wadą są wyższe koszty inwestycyjne i większe wymagania terenowe.

Systemy UTES (Underground Thermal Energy Storage) dzielą się na trzy podstawowe typy: ATES, BTES i CTES. Ich efektywność zależy od warunków geologicznych, objętości magazynu oraz izolacji termicznej. Temperatura przechowywania i jakość izolacji mają kluczowe znaczenie dla ograniczenia strat ciepła.

Przy projektowaniu systemów UTES uwzględnia się także:

- gęstość energii magazynowanej (w kWh/m³),
- koszt inwestycyjny (np. dla BTES 50–150 EUR/kWh),
- sezonowe pokrycie zapotrzebowania cieplnego,
- wpływ przepływu wód gruntowych na efektywność systemu.

W systemach krótkoterminowych dominują zbiorniki buforowe, często wspomagane przez źródła OZE. Ich pojemność cieplna zależy od masy nośnika energii i różnicy temperatur w cyklu pracy.

Przykład obliczenia zakumulowanego ciepła:

$$Q = m \cdot c_p \cdot \Delta T \quad (1)$$

gdzie:

- Q – energia cieplna,
- m – masa medium,
- c_p – ciepło właściwe,
- ΔT – różnica temperatur.

2.2. Magazynowanie ciepła przy użyciu materiałów zmiennofazowych

Magazynowanie ciepła przy użyciu materiałów zmiennofazowych (PCM – Phase Change Materials) polega na akumulacji energii cieplnej poprzez przemianę fazową substancji – najczęściej ze stanu stałego w ciekły lub odwrotnie [3]. Proces ten zachodzi w ściśle określonej temperaturze i pozwala na magazynowanie znacznie większej ilości energii niż tradycyjne nośniki, takie jak woda czy beton.

Zalety PCM to duża gęstość energii – nawet 10 razy wyższa niż w przypadku magazynów jawnych, stabilna temperatura podczas ładowania i rozładowania, możliwość miniaturyzacji magazynów ciepła. Wadami PCM są niska przewodność cieplna (utrudniająca szybki transfer energii) i koszt materiałów.

Najczęściej stosowane materiały PCM to parafiny, kwasy tłuszczowe, hydraty soli, nieorganiczne sole, metale niskotopliwe. Wybór odpowiedniego PCM zależy od zakresu temperatury przemiany fazowej, ciepła przemiany fazowej, przewodności cieplnej, stabilności chemicznej i cyklicznej, toksyczności i palności. Jednak dzięki miniaturyzacji i wysokiej sprawności są one szczególnie przydatne w budownictwie pasywnym, chłodnictwie oraz do stabilizacji temperatury w systemach elektronicznych i medycznych.

Dobór odpowiedniego PCM zależy nie tylko od temperatury przemiany fazowej, ale również od kompatybilności chemicznej z materiałami konstrukcyjnymi oraz stabilności termicznej podczas wielokrotnego cyklu ładowania i rozładowania.

PCM dzielimy na organiczne (parafiny, kwasy tłuszczowe), nieorganiczne (hydraty soli, metale niskotopliwe), eutektyczne mieszaniny (np. parafina + alkohol tłuszczowy). Parafiny mają dobrą stabilność chemiczną i są nietoksyczne, ale cechują się niską przewodnością cieplną. Hydraty soli mają wyższą gęstość energii, lecz podatne są na przechłodzenie i segregację faz.

W celu poprawy przewodnictwa cieplnego PCM stosuje się metalowe lub grafitowe struktury przewodzące, mikrokapsułkowanie PCM, łączenie z matrycą porowatą (np. poliuretan, włókna węglowe). W instalacjach HVAC PCM są często zintegrowane z przegrodami budowlanymi, sufitami chłodzącymi, ścianami akumulacyjnymi lub zbiornikami ciepłej wody użytkowej. Mogą być też stosowane w transporcie leków, urządzeniach elektronicznych oraz systemach odzysku ciepła z przemysłu.

2.3. Gruntowe magazyny ciepła

Gruntowe magazyny ciepła to rozwiązania wykorzystujące naturalną pojemność cieplną gruntu lub skał do sezonowego magazynowania energii cieplnej [3]. Technologia ta pozwala na efektywne przechowywanie ciepła przez długi czas nawet kilka miesięcy bez konieczności stosowania kosztownych zbiorników. Podstawą działania gruntowego magazynu ciepła są gruntowe wymienniki ciepła, które transportują energię cieplną do i z ośrodka magazynującego.

Ich zalety to niski koszt eksploatacji, możliwość lokalizacji niemal w dowolnym miejscu, duża pojemność cieplna zależna od objętości gruntu oraz brak konieczności stosowania specjalnych zbiorników. Wady to ryzyko strat ciepła przez przepływ wód gruntowych, długi czas nagrzewania i rozładowania oraz potrzeba dużych powierzchni terenu przy systemach poziomych.

Czynniki wpływające na efektywność to przewodność i dyfuzyjność cieplna gruntu, obecność wód gruntowych (mogą powodować straty ciepła), geometria i głębokość sond i izolacja termiczna powierzchni.

Gruntowe magazyny ciepła są szczególnie użyteczne w połączeniu z pompami ciepła, gdzie pełnią również funkcję regeneracyjną źródła dolnego. W systemach BTES sondy pionowe instalowane są zazwyczaj w odwiertach o głębokości od 30 do 150 metrów, tworząc układ umożliwiający sezonowe gromadzenie i odbiór energii cieplnej. Medium roboczym jest zwykle roztwór glikolu lub woda. Grunt może pełnić rolę zarówno nośnika ciepła, jak i jego izolatora. Ważnym aspektem w projektowaniu BTES jest rozkład temperatury w ośrodku gruntowym i unikanie zjawiska nadmiernego wychładzania dolnej warstwy. Dlatego często integruje się je z pompami ciepła, które zapewniają lepsze wykorzystanie niskotemperaturowego zasobu.

Parametry efektywności BTES: gęstość energii magazynowanej: ok. 20–50 kWh/m³, sprawność cyklu: 40–60%, koszt inwestycyjny: 40–100 EUR/kWh (zależnie od głębokości i warunków gruntowych) [3].

2.4. Wodne magazyny ciepła (ATES i TTES)

Wodne magazyny ciepła są jedną z najbardziej efektywnych form sezonowego magazynowania energii cieplnej [1]. Wyróżnia się dwa podstawowe typy ATES (Aquifer Thermal Energy Storage) wykorzystujące warstwy wodonośne oraz TTES (Tank Thermal Energy Storage) oparte na sztucznych zbiornikach magazynujących wodę.

System ATES polega na zatłaczaniu ciepłej wody do podziemnych warstw wodonośnych w okresach nadwyżki energii (lato), a następnie jej odzyskiwaniu w zimie. Działa zazwyczaj w konfiguracji dwuotworowej (dwa odwierty: jeden do zatłaczania, drugi do poboru). Ich zalety to bardzo duża pojemność cieplna systemu, stabilność temperaturowa podziemnych zbiorników, niskie koszty eksploatacji, wysoka sprawność całkowita. Ograniczenia ATES to wymagana odpowiednia geologia i hydrogeologia, konieczność uzyskania zezwoleń środowiskowych oraz ryzyko mieszania się warstw wodonośnych.

Z kolei TTES to zbiorniki naziemne lub podziemne (np. stalowe lub żelbetowe), w których magazynowana jest gorąca woda. Mogą być stosowane zarówno w domowych instalacjach, jak i w dużych systemach ciepłowniczych.

Ich sprawność zależy od poziomu izolacji, temperatury magazynowania i powierzchni strat ciepła. W systemach ATES funkcjonują dwie studnie: ciepła i zimna. W okresie letnim woda o podwyższonej temperaturze zatłaczana jest do warstwy wodonośnej (studnia ciepła), natomiast zimą z tej samej warstwy pobiera się wodę do systemu grzewczego, jednocześnie zatłaczając do drugiej studni schłodzoną wodę. Systemy te mogą być bardzo efektywne, osiągając sprawność magazynowania powyżej 80%. Parametry ATES: temperatura pracy: 5–30°C, głębokość warstw wodonośnych: 20–150 m, pojemność cieplna: setki MWh, koszt

inwestycyjny: 1–5 EUR/kWh.

TTES (Tank Thermal Energy Storage) może być wykonany jako zbiornik naziemny (stalowy, izolowany) lub podziemny zbiornik żelbetowy. Ich projekt opiera się na zasadzie minimalizacji strat ciepła poprzez dobór odpowiednich izolacji (np. pianki PUR, wełna mineralna) i systemów utrzymania warstwowości temperatury. Zastosowania TTES obejmują buforowanie ciepła z kolektorów słonecznych, magazynowanie nadmiaru ciepła z elektrociepłowni czy integrację z sieciami ciepłowniczymi.

2.5. Magazynowanie ciepła z wykorzystaniem układów sorpcyjnych i reakcji chemicznych

Magazynowanie ciepła z wykorzystaniem układów sorpcyjnych i reakcji chemicznych polega na przechowywaniu energii w formie wiązań chemicznych. Proces magazynowania zachodzi w wyniku reakcji endoenergetycznych (pochłaniających ciepło), a odzysk energii następuje poprzez reakcje odwrotne egzoenergetyczne (wydzielające ciepło). Dwa główne mechanizmy to sorpcja (adsorpcja lub absorpcja) i reakcje chemiczne odwracalne (np. hydratacja, reakcje gaz-ciało stałe). Najczęściej wykorzystywane materiały to tlenki metali, sole hydratacyjne (np. CaCl₂, MgSO₄) czy zeolity i silikaże (dla adsorpcji). Technologia znajduje zastosowanie w sezonowych magazynach ciepła w budownictwie (np. systemy solarne), mobilnych magazynach energii cieplnej, instalacjach przemysłowych wymagających ciepła procesowego.

Zalety magazynowania chemicznego to bardzo wysoka gęstość energetyczna, praktycznie brak strat podczas długiego przechowywania, możliwość transportu zgromadzonej energii w postaci materiału chemicznego oraz możliwość pracy w temperaturach niskich i wysokich.

Wady tej technologii to złożoność instalacji i sterowania, degradacja materiałów przy wielu cyklach, wyższe koszty inwestycyjne, konieczność precyzyjnej kontroli warunków reakcji.

Choć technologia ta jest wciąż rozwijana, ma duży potencjał w obszarze długoterminowego i bezstratnego przechowywania ciepła, szczególnie w połączeniu z odnawialnymi źródłami energii. Magazyny sorpcyjne wykorzystują procesy fizykochemiczne, w których ciepło jest absorbowane lub wydzielane w trakcie adsorpcji (na powierzchni materiału) lub absorpcji (wewnątrz struktury). Typowe materiały to zeolity, silikaże oraz tlenki litu i wapnia.

Z kolei chemiczne magazyny ciepła (TCES – Thermochemical Energy Storage) opierają się na reakcjach odwracalnych, takich jak odwodnienie/hydratacja (np. Ca(OH)₂ ↔ CaO + H₂O), reakcje utleniania/redukcji (np. MnO₂/Mn₂O₃) czy - reakcje absorpcji gazów (NH₃, H₂O) w solach. Korzyścią z zastosowania reakcji chemicznych jest niemal bezstratne przechowywanie energii przez wiele miesięcy oraz możliwość łatwego transportu materiału reaktywnego. Technologia ta znajduje zastosowanie m.in. w budownictwie pasywnym (magazyny sezonowe), przemyśle chemicznym oraz jako systemy awaryjne odzysku ciepła z procesów wysokotemperaturowych. Parametry TCES to gęstość energii: 150–300 kWh/m³, temperatura pracy: 80–400°C, sprawność: 50–75%, koszt: 5–20 EUR/kWh (w fazie demonstracyjnej).

3. Metody magazynowania energii elektrycznej

W obliczu rosnącego udziału odnawialnych źródeł energii (OZE) oraz potrzeby zwiększenia elastyczności i stabilności systemów elektroenergetycznych, magazynowanie energii elektrycznej zyskuje na znaczeniu. Technologie te umożliwiają gromadzenie nadwyżek energii w okresach niskiego zapotrzebowania i oddawanie jej w momentach szczytowego zużycia.

Do głównych metod magazynowania energii elektrycznej zalicza się akumulatory (elektrochemiczne), superkondensatory, elektrownie szczytowo-pompowe, magazyny sprężonego powietrza oraz magazynowanie wodoru (konwersja elektrochemiczna). Każda z tych technologii posiada odmienną charakterystykę techniczną, kosztową oraz środowiskową.

3.1. Akumulatory

Akumulatory elektrochemiczne to najczęściej stosowana technologia magazynowania energii elektrycznej, zarówno w małych aplikacjach (np. urządzenia mobilne), jak i w dużych systemach energetycznych (np. magazyny przy farmach PV) [5]. Podstawą działania akumulatorów jest odwracalna reakcja elektrochemiczna zachodząca między elektrodami w obecności elektrolitu. Proces ładowania i rozładowania pozwala na wielokrotne użytkowanie.

Najczęściej stosowane są akumulatory litowo-jonowe (Li-ion), kwasowo-ołowiowe, sodowo-siarkowe, redox flow (przepływowe), niklowo-metalowo-wodorkowe. Wykorzystuje się je w domowych systemach PV (off-grid i on-grid), pojazdach elektrycznych, magazynach energii przy farmach wiatrowych i słonecznych oraz do stabilizacji sieci elektroenergetycznych.

Zalety akumulatorów to wysoka sprawność (do 90%), szybka reakcja na zapotrzebowanie, skalowalność systemów, rozwinięta technologia i dostępność na rynku.

Wady to ograniczona liczba cykli życia (szczególnie w tańszych technologiach), ryzyko zapłonu lub wycieku elektrolitu, degradacja pojemności w czasie, wysokie koszty inwestycyjne dla systemów wielkoskalowych.

Koszty akumulatorów są wyrażane m.in. wskaźnikiem LCOS. Dla litowo-jonowych obecnie wynosi on ok. 100–200 USD/kWh, ale spodziewany jest dalszy spadek dzięki rozwojowi technologii i recyklingowi materiałów. Akumulatory litowo-jonowe są obecnie najczęściej stosowanymi urządzeniami do magazynowania energii w sektorze energii odnawialnej. Składają się z katody (zwykle z tlenków metali), anody (z grafitu) oraz elektrolitu ciekłego lub stałego.

W ostatnich latach rozwijane są alternatywne typy akumulatorów LFP (litowo-żelazowo-fosforanowe) – zwiększone bezpieczeństwo i żywotność, NMC (niklowo-manganowo-kobaltowe) – wyższa gęstość energii, akumulatory sodowo-jonowe – tańsze, oparte na powszechnych pierwiastkach, oraz akumulatory przepływowe (redox flow) – skalowalne i trwałe, oddzielają energię od mocy. Ich parametry techniczne to gęstość energii: 100–250 Wh/kg (Li-ion), liczba cykli życia: 2 000–10 000, sprawność ładowania/rozładowania: 85–95%, czas reakcji: poniżej 1 s.

Obecnie kluczowym obszarem staje się recykling akumulatorów ze względu na ograniczoną dostępność litu, kobaltu i niklu.

3.2. Superkondensatory

Superkondensatory, znane również jako ultrakondensatory lub kondensatory dwuwarstwowe, to urządzenia magazynujące energię w polu elektrycznym, a nie w reakcjach chemicznych. W przeciwieństwie do akumulatorów, cechują się bardzo wysoką mocą, ekstremalnie krótkim czasem ładowania i rozładowania oraz dużą liczbą cykli pracy. Zasada działania opiera się na zjawisku podwójnej warstwy elektrostatycznej powstającej na granicy elektroda–elektrolit. Dzięki temu możliwe jest szybkie gromadzenie i uwalnianie ładunku elektrycznego.

Zaletami superkondensatorów są bardzo duża moc chwilowa, czas ładowania/rozładowania liczony w sekundach, bardzo długa żywotność (nawet >1 000 000 cykli), brak efektu pamięci, możliwość pracy w szerokim zakresie temperatur. Do wady zaliczane są niższa gęstość energii w porównaniu do akumulatorów, wyższy koszt jednostkowy energii (USD/kWh) oraz samorozładowanie – trudność w długotrwałym przechowywaniu energii.

Superkondensatory stosowane są do wspomagania systemów baterijnych (hybrydyzacja), systemów zasilania awaryjnego i podtrzymania napięcia (UPS), systemów odzysku energii hamowania (np. w tramwajach i windach) oraz do stabilizacji napięcia i mocy w mikrosieciach. Superkondensatory wykorzystywane są również jako systemy buforowe w pojazdach szynowych, pojazdach elektrycznych, a także do odzysku energii hamowania (regeneracyjnego). W połączeniu z akumulatorami zwiększają stabilność napięciową i wydłużają żywotność ogniw głównych.

Superkondensatory stanowią obiecującą technologię w zastosowaniach wymagających dużej mocy i niezawodności, szczególnie tam, gdzie istotna jest częsta cykliczna praca i bardzo szybki transfer energii. W superkondensatorach energia magazynowana jest na granicy elektrody i elektrolitu w postaci podwójnej warstwy elektrycznej. Nie zachodzi tu przemiana chemiczna, co sprawia, że procesy są odwracalne i bardzo szybkie. Nowoczesne rozwiązania obejmują tzw. kondensatory hybrydowe które łączą wysoką gęstość energii baterii z dużą mocą superkondensatora.

Ich parametry techniczne to gęstość energii: 5–15 Wh/kg, gęstość mocy: do 10 000 W/kg, czas ładowania: od 1 do 10 sekund, żywotność: > 1 milion cykli.

3.3. Elektrownie szczytowo-pompowe

Elektrownie szczytowo-pompowe (ESP) to najstarsza i najbardziej rozwinięta technologia wielkoskalowego magazynowania energii elektrycznej [2]. Opierają się na zasadzie magazynowania energii w postaci potencjalnej poprzez pompowanie wody do górnego zbiornika w czasie nadmiaru energii, a następnie jej uwalnianie do dolnego zbiornika przez turbiny w czasie szczytowego zapotrzebowania.

Zalety ESP to bardzo duża pojemność energetyczna (nawet setki MWh), wysoka sprawność cyklu (70–85%), długa żywotność techniczna (ponad 50 lat) oraz stabilna praca i możliwość regulacji częstotliwości sieci.

Wadami są wymagana odpowiednia topografia terenu, duże koszty inwestycyjne, długi czas budowy i procedury środowiskowe, ograniczona liczba lokalizacji na świecie.

ESP stosowane są do stabilizacji systemu elektroenergetycznego, bilansowania dziennego cyklu produkcji i zapotrzebowania, integracji z OZE (kompensacja niestabilnej generacji) oraz jako

rezerwa mocy dla operatorów systemów przesyłowych.

ESP stanowią podstawę magazynowania energii w krajach górzystych. Ich rozwój może być wspierany poprzez modernizację istniejących zbiorników wodnych i zastosowanie rozwiązań podziemnych (pompownie w wyrobiskach górniczych). ESP mogą działać w cyklu dziennym (ładowanie w nocy, rozładowanie w ciągu dnia) lub sezonowym w zależności od różnicy poziomów zbiorników i wielkości magazynowanej objętości wody.

Typowa konfiguracja ESP obejmuje górny zbiornik (naturalny lub sztuczny), dolny zbiornik (np. jezioro, rzeka, zatoka), rurociągi i komory ciśnieniowe oraz turbiny wodne i pompy odwracalne. Nowoczesne projekty zakładają budowę ESP w opuszczonych kopalniach lub tunelach. Warianty te pozwalają ograniczyć wpływ na środowisko oraz zwiększyć dostępność lokalizacji na terenach nizinnych.

Parametry techniczne ESP to moc: 100–1000 MW, pojemność: do 1000 MWh, sprawność: 70–85%, czas reakcji: kilka minut.

3.4. Magazyny sprężonego powietrza

Magazyny sprężonego powietrza (CAES – Compressed Air Energy Storage) to systemy, w których energia elektryczna jest przekształcana w energię sprężonego powietrza i magazynowana w podziemnych zbiornikach, takich jak kawerny solne, kopalnie lub specjalne zbiorniki [5]. Podczas rozładowania sprężone powietrze jest uwalniane i napędza turbiny generujące energię elektryczną. Zbiorniki sprężonego powietrza mogą być podziemne (kawerny solne, pokłady węgla), naziemne (zbiorniki stalowe lub betonowe) oraz zintegrowane z istniejącą infrastrukturą (np. kopalnie, tunele).

Dwa główne typy CAES to konwencjonalne (diabatyckie) – ciepło sprężania jest tracone lub wykorzystywane częściowo oraz adiabatyczne – ciepło jest magazynowane i wykorzystywane przy rozprężaniu, co zwiększa sprawność.

Zalety CAES to duża skala możliwej pojemności (setki MWh), długi czas przechowywania bez strat, relatywnie niskie koszty magazynowania energii oraz możliwość integracji z OZE. Wady to stosunkowo niska sprawność całkowita (ok. 40–60%), konieczność odpowiednich warunków geologicznych, hałas i złożoność systemu chłodzenia i ogrzewania powietrza oraz potrzeba gazu ziemnego w niektórych konfiguracjach.

Przykładowe zastosowania CAES to stabilizacja systemu energetycznego w okresach szczytowych, magazynowanie nadwyżek energii z farm wiatrowych czy rezerwa mocy i wsparcie systemów awaryjnych.

W systemach CAES energia mechaniczna sprężonego powietrza jest przekształcana ponownie w energię elektryczną za pomocą turbin gazowych lub ekspanderów. Konwencjonalne CAES (np. Huntorf w Niemczech) wymagają dostarczania gazu ziemnego do podgrzewania powietrza przed rozprężeniem, co obniża sprawność systemu.

Systemy adiabatyczne (A-CAES) gromadzą ciepło powstałe przy sprężaniu w osobnym zbiorniku i wykorzystują je podczas rozprężania, co eliminuje potrzebę spalania paliw kopalnych i zwiększa sprawność.

Nowe koncepcje CAES obejmują sprężanie izotermiczne (z chłodzeniem ciągłym), zastosowanie magazynów cieplnych na stopione sole oraz integrację z mikrosieciami opartymi na OZE.

Parametry techniczne to ciśnienie magazynowania: 60–100 bar,

pojemność: setki MWh, sprawność diabatycka: 40–55%, sprawność adiabatyczna: do 70%.

3.5. Magazynowanie wodoru

Magazynowanie wodoru to technologia konwersji energii elektrycznej na wodór w procesie elektrolizy, a następnie jego przechowywania i ponownego przetwarzania na energię elektryczną (np. w ogniwach paliwowych). Wodór pełni tu rolę nośnika energii chemicznej o dużej pojemności magazynowania. Proces składa się z trzech etapów: elektroliza wody (energia elektryczna → wodór), magazynowanie wodoru (sprężony, skroplony, w materiałach stałych) oraz konwersja (ogniwa paliwowe lub spalanie wodoru).

Zalety technologii to możliwość długoterminowego przechowywania energii, integracja z odnawialnymi źródłami energii, zeroemisyjność przy wykorzystaniu zielonego wodoru oraz możliwość transportu i wykorzystania w wielu sektorach (przemysł, transport, energetyka). Wadami są niska sprawność całkowita (30–40%), wysokie koszty elektrolizerów i magazynów, trudności z magazynowaniem i bezpieczeństwem wodoru oraz potrzeba infrastruktury (sieci wodorowe, stacje tankowania).

Magazyny wodoru mogą wspierać stabilizację pracy sieci OZE (power-to-gas), dostarczać paliwa dla transportu ciężkiego i morskiego czy dla zasilania awaryjnego w infrastrukturze krytycznej czy pełnić rolę magazynów energii w skali przemysłowej. Wodór ma potencjał jako nośnik energii sezonowej i międzysektorowej. Rozwój gospodarki wodorowej zależy od obniżenia kosztów i poprawy efektywności.

Wodór można magazynować w różnych formach: sprężony (350–700 bar), skroplony (–253°C), chemicznie (np. w metalach wodorowych, amoniaku) czy w materiałach porowatych (grafen, metal-organic frameworks).

Wodór może być również używany jako nośnik energii w sektorze przemysłowym, transporcie a także w procesach power-to-gas i power-to-liquid. Wyzwaniami pozostają: bezpieczeństwo (eksplozje), niska efektywność i koszty infrastruktury. Rozwój rynku zależy od wsparcia regulacyjnego i dalszych innowacji w produkcji oraz magazynowaniu wodoru.

Technologia elektrolizy dzieli się na: alkaliczne elektrolizery (AEL) – dojrzała technologia, niskie koszty, PEM (membranowe) – wyższa sprawność, elastyczność pracy oraz SOEC (wysokotemperaturowe) – największa sprawność, ale w fazie rozwoju. Parametry techniczne: sprawność elektrolizy: 60–80%, gęstość energii wodoru: 33,3 kWh/kg, sprawność ogniw paliwowych: 40–60%, całkowita sprawność magazynowania: 25–40%.

4. Wnioski końcowe

Na podstawie przeprowadzonej analizy metod magazynowania energii można stwierdzić, że każda z technologii posiada unikalne cechy. Magazynowanie energii cieplnej jest optymalnym rozwiązaniem dla systemów ciepłowniczych, budownictwa i instalacji solarnych. Z kolei magazyny energii elektrycznej, takie jak akumulatory czy elektrownie szczytowo-pompowe, znajdują zastosowanie w stabilizacji sieci i kompensacji zmienności źródeł odnawialnych.

Kluczowe czynniki wpływające na wybór odpowiedniego magazynu to:

- czas magazynowania (krótkoterminowy vs. długoterminowy),
- skala zastosowania (indywidualna, przemysłowa, systemowa),
- koszty inwestycyjne i operacyjne,
- sprawność energetyczna i środowiskowa.

Nie istnieje jedna uniwersalna technologia magazynowania energii, ich synergia w ramach inteligentnych sieci energetycznych może zapewnić stabilność systemu i efektywność transformacji energetycznej. Przeprowadzona analiza wskazuje, że magazynowanie energii będzie kluczowym elementem transformacji energetycznej.

Każda z przedstawionych technologii ma inne zastosowania i różny potencjał komercyjny:

- akumulatory sprawdzają się w aplikacjach krótkoterminowych i mobilnych,
- ESP i CAES są odpowiednie dla wielkoskalowych systemów elektroenergetycznych,
- technologie wodoru umożliwiają magazynowanie energii sezonowej i międzysektorowej,
- metody termiczne najlepiej integrują się z systemami ciepłowniczymi i budownictwem energooszczędnym.

Wybór technologii powinien opierać się na analizie lokalnych warunków, profilu zużycia energii, dostępności infrastruktury oraz planowanego modelu zarządzania energią (np. mikrosieci, prosumenci, agregatorzy).

Wnioski wskazują na potrzebę synergii różnych metod magazynowania w celu zapewnienia elastyczności i bezpieczeństwa dostaw energii w systemach opartych na źródłach odnawialnych.

4.1. Podsumowanie kosztów

Koszty wdrożenia i eksploatacji magazynów energii zależą od wielu czynników, takich jak technologia, skala systemu, lokalizacja czy dostępność surowców. W celu porównania różnych technologii stosuje się wskaźnik LCOS (Levelized Cost of Storage), wyrażający koszt jednostkowy magazynowanej energii (USD/kWh). Porównanie przykładowych kosztów poszczególnych

technologii magazynowania energii podano w tabeli 1.

Warto zaznaczyć, że magazynowanie ciepła cechuje się najniższym kosztem jednostkowym przy długim czasie magazynowania, natomiast technologie elektrochemiczne wyższą ceną, ale lepszą wydajnością przy krótkim czasie i dużej dynamice. Koszty magazynowania energii są nie tylko funkcją zastosowanej technologii, ale także skali instalacji, czasu użytkowania, kosztów utrzymania i integracji z innymi systemami (np. fotowoltaika, kogeneracja).

Wskaźnik LCOS nie uwzględnia wszystkich elementów ekonomicznych takich jak wartość elastyczności, wpływ na stabilność sieci czy koszt unikniętych emisji CO₂. Dlatego coraz częściej analizuje się tzw. wartości graniczne dla konkretnego scenariusza.

Dodatkowo:

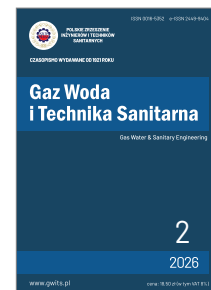
- systemy o dużej liczbie cykli rocznie (np. akumulatory) szybciej amortyzują nakłady inwestycyjne,
- magazyny długoterminowe (np. wodór, ciepło sezonowe) mają niższy koszt jednostkowy przeliczeniowy,
- koszt energii magazynowanej zależy też od efektywności (sprawności) systemu i strat przesyłowych.

5. Bibliografia

- [1] Hittinger, E., & Ciez, R. E. (2020). Modeling costs and benefits of energy storage systems. *Annual Review of Environment and Resources*, 45, 445–469. <https://doi.org/10.1146/annurev-environ-012320-082101>
- [2] Ralon, P., Taylor, M., Ilas, A., Diaz-Bone, H., & Kairies, K.-P. (2017). *Electricity storage and renewables: Costs and markets to 2030*. International Renewable Energy Agency
- [3] Chwieduk, D., & Jaworski, M. (2023). *Energetyka odnawialna w budownictwie. Magazynowanie energii*. Wydawnictwo Naukowe PWN
- [4] Krośnicki, P. (2025). *Metody magazynowania energii – zalety, wady i koszty*. Państwowa Akademia Nauk Stosowanych im. Ignacego Mościckiego w Ciechanowie
- [5] Ceran, B. (2018). A comparative analysis of energy storage technologies. *Polityka Energetyczna – Energy Policy Journal*, 21(3), 97–110. <https://doi.org/10.24425/124498>

Tabela 1. Porównanie kosztów poszczególnych technologii
Table 1. Comparison of costs of individual technologies

Technologia	Koszt magazynowania [EUR/kWh]	Szacunkowy koszt systemu 100 kWh [EUR]
Magazynowanie za pomocą PCM	300–500	30 000–50 000
Gruntowe magazyny ciepła (GTES)	50–150	5 000–15 000
Wodne magazyny ciepła (ATES/TTES)	30–120	3 000–12 000
Chemiczne magazyny ciepła	500–2 000	50 000–200 000
Akumulatory	200–500	20 000–50 000
Superkondensatory	500–1 500	50 000–150 000
Elektrownie szczytowo-pompowe	1 000–2 000	100 000–200 000
Magazynowanie sprężonego powietrza	100–500	10 000–50 000
Magazynowanie wodoru	500–2 000	50 000–200 000



Techniki elektrowydzielania w odzysku surowców krytycznych z odpadów elektrycznych i elektronicznych – przegląd i analiza literatury

Electrodeposition techniques for the recovery of critical raw materials from electrical and electronic waste – review and literature analysis

Maciej Dańczak¹, Agnieszka Sobianowska-Turek^{1*} 

¹ Katedra Gospodarki Wodno-Ściekowej i Technologii Odpadów, Wydział Inżynierii Środowiska, Politechnika Wrocławska

* Kontakt / Correspondence: agnieszka.sobianowska-turek@pwr.edu.pl

Streszczenie:

W artykule dokonano przeglądu wybranych metod elektrochemicznych odzysku metali z odpadów polimetalicznych, z naciskiem na surowce krytyczne w sprzęcie elektrycznym i elektronicznym. Omówiono elektrowydzielanie metali i wpływ potencjału redukcyjnego na możliwość prowadzenia procesów oraz selektywność odzysku. Scharakteryzowano elektrodpozycję, elektrosorpcję, elektrodializę, elektrokoagulację oraz elektrolizę zawiesinową. Wskazano kierunki integracji z OZE oraz możliwość zastosowania rozpuszczalników eutektycznych jako alternatywy dla silnie kwaśnych elektrolitów. Metody elektrochemiczne stanowią kierunek rozwoju technologii recyklingu, zgodny z założeniami gospodarki o obiegu zamkniętym oraz zrównoważonego zarządzania zasobami.

Słowa kluczowe: elektrowydzielanie, elektrochemia, recykling, odpady elektroniczne, surowce krytyczne

Abstract:

This article reviews selected electrochemical methods of metals recovery from polymetallic waste, with emphasis on critical raw materials in waste electrical and electronic equipment. The metal electrodeposition is discussed, highlighting the influence of reduction potential on process feasibility and recovery selectivity. The electrochemical techniques are characterized: electrodeposition, electrosorption, electrodialysis, electrocoagulation and slurry electrolysis. Potential pathways for RES integrating are proposed, along with the use of eutectic solvents as an alternative to strongly acidic electrolytes. Electrochemical methods represent a promising direction for the development of recycling technologies, consistent with the principles of the circular economy and sustainable resource management.

Keywords: electrowinning, electrochemistry, recycling, electronic waste, critical raw materials

1. Wprowadzenie

Nieustający postęp techniczny we współczesnym świecie, napędzany dynamicznym rozwojem zaawansowanych technologii, w coraz większym stopniu kształtuje funkcjonowanie globalnej gospodarki surowców krytycznych. Surowce te stanowią fundament rozwoju nowoczesnych gałęzi przemysłu, ponieważ dzięki swoim unikatowym właściwościom fizycznym i chemicznym są wykorzystywane jako niezbędne komponenty w produkcji zaawansowanych urządzeń, systemów energetycznych, elektroniki, technologii informatycznych oraz rozwiązań wspierających transformację energetyczną [1].

Jednocześnie zasoby te charakteryzują się ograniczonym występowaniem w środowisku naturalnym, co skutkuje relatywnie

niski poziom wydobycia ze złóż pierwotnych. Nierównomierne, często silnie rozproszone rozmieszczenie złóż dodatkowo powoduje, że ich eksploatacja jest skoncentrowana jedynie w wybranych regionach. W konsekwencji globalny rynek wydobycia i eksportu surowców krytycznych pozostaje zdominowany przez niewielką liczbę państw dysponujących najbogatszymi lub najbardziej opłacalnymi złożami. Taka koncentracja produkcji oraz handlu prowadzi do zwiększenia podatności światowych łańcuchów dostaw na zakłócenia o charakterze gospodarczym, politycznym i geopolitycznym. Ograniczona liczba dostawców, niestabilność regionów wydobywczych oraz możliwość wprowadzania restrykcji eksportowych przez państwa dominujące na rynku stwarzają realne zagrożenie dla bezpieczeństwa, stabilności oraz ciągłości dostaw [2].

Jednym ze sposobów ograniczenia ryzyka niedoboru surowców krytycznych jest rozwój technologii recyklingu. Proces ten umożliwia odzysk i ponowne wykorzystanie surowców z różnych strumieni odpadów, w szczególności ze zużytego sprzętu elektrycznego i elektronicznego (ZSEiE). Zamiast kierować tego rodzaju odpady na składowiska, mogą one być przetwarzane w wyspecjalizowanych zakładach, sprzyjając efektywnemu wykorzystaniu zasobów oraz wpisując się w założenia gospodarki o obiegu zamkniętym. Tradycyjne metody odzysku, takie jak pirometalurgia i hydrometalurgia, mimo wysokiej skuteczności, mogą negatywnie wpływać na środowisko ze względu na znaczne zużycie odczynników chemicznych oraz emisję szkodliwych gazów. Alternatywę stanowią procesy elektrochemiczne, które wykorzystują energię elektryczną do selektywnego odzysku surowców. Ich wdrożenie w skali przemysłowej może istotnie zwiększyć poziom recyklingu surowców krytycznych, jednocześnie ograniczając ilość odpadów kierowanych na składowiska [3].

2. Strumień odpadów

Strumień zużytego sprzętu elektrycznego i elektronicznego (ZSEiE) jest jednym z najbogatszych źródeł surowców krytycznych, a jego ilość w skali światowej systematycznie rośnie. Zgodnie z raportem Global E-Waste Monitor 2024, w 2022 roku wygenerowano 62 miliony ton ZSEiE, co stanowi wzrost o ponad 80% w porównaniu z rokiem 2010. Prognozy wskazują dalszy wzrost o około 30% do 2030 roku, co oznacza, że wówczas powstanie aż 82 miliony ton odpadów elektrycznych i elektronicznych na całym świecie [4]. Również dla Polski możliwe jest określenie ilości powstającego ZSEiE na podstawie raportu Głównego Urzędu Statystycznego z 2024 roku dotyczącego Ochrony Środowiska. W 2022 roku do obrotu wprowadzono łącznie 1,3 miliona ton sprzętu elektronicznego różnej wielkości, jednakże jedynie 488 tysięcy ton zostało odebranych jako odpady, w tym 399 tysięcy ton pochodzących z gospodarstw domowych. Dane te wskazują na znaczną dysproporcję między ilością wprowadzanego sprzętu a faktycznie zbieranymi odpadami, co podkreśla potrzebę rozwoju efektywnych systemów zbiórki i recyklingu [5].

W ujęciu masowym strumienia ZSEiE dominują urządzenia wielkogabarytowe, które stanowią średnio 40–50% jego całkowitej masy [6]. Urządzenia małogabarytowe oraz sprzęt technologii informacyjnych i komunikacyjnych odpowiadają natomiast za około 20–25% masy strumienia. Pomimo wyraźnie mniejszego udziału masowego, to właśnie ta grupa urządzeń charakteryzuje się znacznie większym potencjałem recyklingowym. Jest to efektem wysokiej zawartości surowców krytycznych, wynikającej ze złożonej struktury [7]. Miniaturyzacja elementów, takich jak układy scalone czy płytki drukowane, wymaga zastosowania wyjątkowych właściwości materiałów, które zapewniają prawidłowe funkcjonowanie urządzeń elektronicznych. Szczególnie istotną rolę odgrywają płytki drukowane wraz z zamontowanymi na ich powierzchni elementami, zawierającymi znaczące ilości metali zarówno podstawowych, jak i szlachetnych. Choć płytki drukowane stanowią jedynie niewielki procent masy całkowitej strumienia odpadów, reprezentują one jednocześnie najbardziej zasobną pod względem surowcowym frakcję. Płytki drukowane są elementem stosunkowo lekkim i odpowiada za niewielki udział masowy całego urządzenia, jednak jej wartość

materiałowa jest nieproporcjonalnie wysoka [8].

Płytki drukowane są standardowym elementem urządzeń elektronicznych i pełnią funkcję „układu nerwowego”, odpowiadając za przesyłanie sygnałów oraz energii elektrycznej pomiędzy poszczególnymi podzespołami. Konstrukcja płytki składa się z wielowarstwowych kompozytów, łączących materiały niemetaliczne z metalicznymi. Metale wykorzystywane są głównie w postaci ścieżek przewodzących, zapewniających połączenia elektryczne pomiędzy elementami umieszczonymi na powierzchni płytki. Szacuje się, że jedna tona zużytych płytek PCB może zawierać nawet do 250 g złota, 1000 g srebra oraz 50 g palladu, co czyni je znacznie bogatszym źródłem surowców niż wiele naturalnie występujących rud kopalin [9].

3. Procesy poprzedzające odzysk metali metodami elektrowydzielania

Nieodłącznym elementem płytek drukowanych są komponenty montowane na ich powierzchni, dlatego ich odpowiednie przetwarzanie umożliwia osiągnięcie wysokiego poziomu recyklingu oraz odzysku surowców. Procesy przygotowawcze poprzedzające elektrochemiczny odzysk metali można zasadniczo podzielić na dwa główne podejścia: mechaniczne przetwarzanie połączone z procesami hydrometalurgicznymi oraz pirometalurgię połączoną z hydrometalurgią. Niezależnie od przyjętego łańcucha technologicznego, etapem wstępnym jest zawsze wymontowanie płytki drukowanej z urządzenia elektronicznego [10].

Mechaniczna obróbka płytek drukowanych może być przeprowadzana w sposób mniej lub bardziej zaawansowany. W zakładach o niższym stopniu zaawansowania proces ten często opiera się na ręcznym demontażu elementów montowanych powierzchniowo. Z kolei w nowoczesnych instalacjach stosuje się zautomatyzowane metody separacji, wykorzystujące procesy termiczne lub mechaniczne, często realizowane z użyciem robotów przemysłowych. W przypadku separacji termicznej cała wymontowana płytka jest podgrzewana do temperatury 250–350°C, co prowadzi do stopienia spoiwa lutowniczego i uwolnienia elementów powierzchniowych od części organicznej [11].

Procesy pirometalurgiczne polegają na wysokotemperaturowym przetwarzaniu frakcji wsadowej w celu otrzymania półproduktów lub produktów umożliwiających dalszy odzysk surowców. Ich głównym celem jest usunięcie frakcji organicznej i skoncentrowanie części metalicznej, dlatego metody te zazwyczaj nie wymagają skomplikowanej, wstępnej obróbki mechanicznej. Pirometalurgiczne przetwarzanie płytek drukowanych można podzielić na cztery podstawowe techniki: pirolizę, zgazowanie, wytapianie oraz spalanie. Każda z tych metod prowadzona jest w odmiennych warunkach i pozwala na uzyskanie różnych półproduktów [12].

Hydrometalurgia stanowi końcowy etap przygotowania materiału przed zastosowaniem metod elektrochemicznych, wykorzystujących energię elektryczną do wydzielania metali. Proces ten polega na ługowaniu, czyli przeprowadzeniu części metalicznej z fazy stałej do fazy ciekłej w postaci jonów, tworząc roztwór elektrolityczny. Roztwory ługujące uzyskuje się najczęściej przy użyciu kwasów, w szczególności kwasu siarkowego (VI), kwasu azotowego (V), lub zasad. W celu zapewnienia optymalnych warunków procesu oraz zwiększenia jego efektywności, płytki dru-

owane poddaje się wcześniejszemu rozdrobnieniu przed wprowadzeniem do roztworu ługującego. Pozwala to na zwiększenie powierzchni kontaktu faz, przy jednoczesnym ograniczeniu kosztów procesu i skróceniu czasu ługowania [13]. Dobór odpowiedniego rozpuszczalnika uzależniony jest od rodzaju odzyskiwanego surowca. Roztwory kwasowe stosowane są głównie do ługowania metali nieszlachetnych, natomiast metale półszlachetne i szlachetne często wymagają zastosowania dodatkowych utleniaczy. Przykładowo miedź, ze względu na swoje właściwości fizykochemiczne zaliczana jest do metali półszlachetnych. Aby uzyskać wysoki stopień przejścia do roztworu jonowego, miedź może być ługowana w obecności nadtlenku wodoru, który pełni rolę skutecznego utleniacza [10].

4. Omówienie wybranych metody elektrowydzielania

Elektrowydzielanie jest procesem elektrochemicznym prowadzonym w układzie ogniwa elektrolitycznego, którego podstawowymi elementami są anoda, katoda oraz roztwór elektrolityczny. Siłą napędową procesu jest przepływ energii elektrycznej przez elektrolit otrzymany w wyniku wcześniejszych procesów ługowania hydrometalurgicznego. Roztwór ten zawiera rozpuszczone jony metali, które na powierzchni katody ulegają redukcji, umożliwiając otrzymanie surowca w postaci metalicznej. Wydzielanie metalu jest tym łatwiejsze, im jego potencjał redukcyjny jest bliższy umownemu zeru skali potencjałów elektrochemicznych, wyznaczanemu przez standardową elektrodę wodorową, której potencjał wynosi $4,44 \pm 0,02$ V w temperaturze 25°C. Istotną zaletą elektrowydzielania jest możliwość selektywnego odzysku oraz rafinacji metali z roztworów pochodzących z przetwarzania odpadów polimetalicznych. Odpowiednie dostosowanie parametrów procesu, takich jak gęstość prądu, skład chemiczny i pH elektrolitu oraz rodzaj i właściwości materiałów elektrodowych, umożliwia selektywne wydzielanie określonego surowca [14].

Metody elektrochemicznego wydzielania metali obejmują kilka podtypów, różniących się modyfikacją podstawowego schematu procesu w celu zwiększenia selektywności i efektywności odzysku. Do najczęściej wyróżnianych należą: elektrodpozycja, elektrosorpcja, elektrodializa, elektrokoagulacja oraz elektroliza szlamów powstających po procesach elektrowydzielania.

4.1. Elektrodpozycja

Elektrodpozycja jest jedną z najpowszechniej stosowanych i najdłużej rozwijanych metod elektrochemicznego wydzielania metali. Proces ten polega na redukcji dodatnio naładowanych jonów metali na powierzchni katody, w wyniku czego przechodzą one ze stanu jonowego do postaci metalicznej. Jednocześnie elektrodpozycja należy do najprostszych technicznie metod elektrowydzielania, gdyż może być prowadzona w klasycznym, nieskomplikowanym reaktorze elektrochemicznym. Prostota układu technologicznego, w połączeniu z możliwością efektywnego odzysku metali o wysokiej czystości, sprawia, że metoda ta znajduje szerokie zastosowanie zarówno w przemyśle, jak i w badaniach naukowych [15]. Pierwsze intensywne badania nad elektrodpozycją metali rozpoczęto w latach siedemdziesiątych XX wieku. Początkowo koncentrowano się na metalach charakteryzujących się dodatnim potencjałem redukcyjnym,

w szczególności na miedzi i srebrze. Dodatnia wartość potencjału umożliwiała prowadzenie procesu w środowisku wodnym, przy zachowaniu stabilności elektrochemicznej wody. Praca w tym zakresie potencjałów ograniczała występowanie niepożądanych reakcji ubocznych, takich jak wydzielanie wodoru lub tlenu, które mogłyby prowadzić do pogorszenia jakości wydzielanego surowca. Jednocześnie zwiększało to bezpieczeństwo eksploatacyjne oraz stabilność procesu [16].

Wydzielanie niektórych metali jest jednak utrudnione ze względu na ich potencjały redukcyjne. Metale o skrajnie dodatnich lub ujemnych wartościach potencjału wymagają prowadzenia procesu poza optymalnym zakresem stabilności elektrochemicznej elektrolitu, co ogranicza efektywność i selektywność odzysku. Dodatkowo metale o zbliżonych potencjałach redukcyjnych mogą ulegać współosadzaniu na powierzchni elektrody, prowadząc do obniżenia czystości produktu końcowego. Przykładem takiego układu jest mieszanina kobaltu ($-0,28$ V) i niklu ($-0,257$ V), dla której selektywne wydzielanie ze wspólnego roztworu jest utrudnione ze względu na podobieństwo właściwości elektrochemicznych. Sелеktywność procesu można jednak zwiększyć, stosując modyfikację powierzchni katody poprzez jej wstępne pokrycie cienką warstwą kobaltu. Sprzyja to osadzaniu się jonów tego metalu, obniżając wymagany potencjał redukcyjny o około 200 mV i zwiększając różnicę potencjałów pomiędzy poszczególnymi składnikami roztworu [16].

4.2. Elektrosorpcja

Elektrosorpcja jest procesem adsorpcji jonów lub koloidów wspomaganą działaniem pola elektrycznego. Naładowane cząstki przemieszczają się w roztworze w kierunku elektrody o przeciwnym znaku ładunku, gdzie ulegają separacji z fazy ciekłej. Podstawą tego procesu jest dejonizacja pojemnościowa, w której jony gromadzone są w podwójnej warstwie elektrycznej pod wpływem sił elektrostatycznych. Mechanizm ten charakteryzuje się jednak stosunkowo niską selektywnością, którą można zwiększyć poprzez zastosowanie membran jonoselektywnych, prowadząc do procesu membranowej dejonizacji pojemnościowej. Należy podkreślić, że w elektrosorpcji nie zachodzi bezpośredni transfer elektronów pomiędzy elektrodą a elektrolitem [16].

W przypadku elektrod wykonanych z silnie porowatego węglą aktywnego obserwuje się preferencyjne usuwanie kationów dwuwartościowych w porównaniu do jednowartościowych, co wynika z relacji pomiędzy rozmiarem jonów a wielkością porów elektrody. Wzrost przyłożonego potencjału sprzyja nasileniu tych efektów i zwiększeniu selektywności jonowej. Dodatkowo selektywność można poprawić poprzez modyfikację chemiczną powierzchni elektrody, na przykład przez wprowadzenie ujemnie naładowanych grup karboksylowych, uzyskiwanych w wyniku utleniania elektrody kwasem azotowym. Alternatywnym sposobem zwiększenia selektywności procesu jest modyfikacja wielkości oraz rozkładu porów na powierzchni elektrody. Regulacja struktury porowatej realizowana jest poprzez proces aktywacji prowadzony w reaktorze w atmosferze CO₂, w temperaturze 950°C. Zastosowane warunki aktywacji mają bezpośredni wpływ na charakterystykę otrzymanej elektrody. Elektrody o niskim stopniu aktywacji charakteryzują się przewagą porów o mniejszych średnicach oraz niewielką utratą masy w trakcie

etapu przygotowawczego. Z kolei elektrody o wysokim stopniu aktywacji posiadają większy udział porów o dużych rozmiarach, czemu towarzyszy wyraźnie większa utrata masy materiału [16].

Proces elektrosorpcji może zachodzić również poprzez interkalację jonów w wolne przestrzenie sieci krystalicznej elektrody. Pod wpływem przepływu elektronów jony są wbudowywane w strukturę krystaliczną materiału elektrodowego, a następnie uwalniane podczas etapu rozładowywania elektrody [17].

4.3. Elektrodializa

Elektrodializa jest procesem separacji jonów z roztworów elektrolitycznych, w którym siłę napędową stanowi przyłożony potencjał elektrochemiczny. Nieodłącznym elementem układu są membrany jonowymienne jedno- lub dwubiegunowe. W konwencjonalnych systemach stosuje się membrany kationowymienne zawierające ugrupowania o ładunku ujemnym, takie jak grupy sulfonianowe lub karboksylanowe, oraz membrany anionowymienne z ugrupowaniami o ładunku dodatnim, najczęściej trzeciorzędowymi lub czwartorzędowymi grupami aminowymi. Na efektywność i selektywność procesu wpływają właściwości membran, skład i stężenie roztworu oraz warunki prowadzenia procesu elektrochemicznego [16].

Nowoczesne rozwiązania coraz częściej wykorzystują układy hybrydowe oraz zaawansowane materiały membranowe. Przykładem jest hybrydowa elektrodializa z zastosowaniem rozpuszczalników głęboko eutektycznych, umożliwiającą skuteczną separację wolframu i arsenu. Rozpuszczalniki te, będące mieszaninami dwóch lub więcej związków chemicznych, charakteryzują się nowymi często korzystniejszymi właściwościami fizykochemicznymi w porównaniu do ich składników, niską toksycznością i dobrą biodegradowalnością, co czyni je rozwiązaniem bardziej przyjaznym środowisku w porównaniu z klasycznymi rozpuszczalnikami [18].

4.4. Elektrokoagulacja

Elektrokoagulacja polega na wytwarzaniu koagulantów in situ w wyniku elektrochemicznego utleniania anody protektorowej, najczęściej wykonanej z żelaza lub aluminium. Reakcje anodowe prowadzą do powstawania kationów tych metali przechodzących do roztworu oraz do utleniania wody z wydzielaniem tlenu. Równocześnie na katodzie zachodzi redukcja wody z wytworzeniem wodoru i jonów wodorotlenkowych, a w pewnych warunkach także redukcja jonów metali obecnych w elektrolicie. Powstałe kationy metali ulegają hydrolizie, tworząc wodorotlenki i polimerowe kompleksy hydroksylowe, których charakter zależy od pH roztworu. Związki te koagulują zanieczyszczenia, prowadząc do ich strącania, a wydzielające się gazy sprzyjają flotacji osadów [19].

Pomimo licznych zalet elektrokoagulacji, takich jak wysoka skuteczność usuwania zanieczyszczeń, prosta aparatura i łatwość obsługi, jej istotnym ograniczeniem jest brak selektywności w przypadku obecności wielu metali w roztworze. Dodatkowym problemem jest powstawanie osadów wodorotlenkowych, co wymaga wprowadzenia kolejnych etapów separacji metali. Z tego względu elektrokoagulacja znajduje zastosowanie głównie jako metoda oczyszczania roztworów, a nie selektywnego odzysku metali [16].

4.5. Elektroliza zawieszinowa

Elektroliza zawieszinowa stanowi odmienną metodę elektrowydzielania w porównaniu do klasycznych procesów prowadzonych z roztworów elektrolitycznych otrzymywanych w wyniku sekwencyjnego zastosowania procesów pirometalurgicznych i hydrometalurgicznych. Jej istotną cechą jest integracja etapów ługowania oraz elektrowydzielania w ramach jednego procesu technologicznego. Proces ten może być realizowany w warunkach temperatury pokojowej oraz przy ciśnieniu atmosferycznym, co przekłada się na redukcję kosztów eksploatacyjnych. W trakcie elektrolizy do medium wprowadzane są sproszkowane płytki drukowane, tworzące heterogeniczny układ zawieszinowy. Częstki fazy stałej ulegają elektrochemicznemu utlenianiu na anodzie, natomiast na katodzie zachodzi selektywne osadzanie metali. Specyfika elektrolizy zawieszinowej umożliwia również łatwe zastosowanie odnawialnych źródeł energii jako źródła zasilania, co zwiększa środowiskową atrakcyjność tej metody w porównaniu z innymi technikami odzysku metali [20].

Pomimo prostoty prowadzenia procesu oraz umiarkowanych wymagań, konwencjonalna elektroliza zawieszinowa prowadzona jest zazwyczaj w środowisku silnie kwaśnym, niezbędnym do efektywnego wydzielania metali. Obecność kwasu ogranicza wytrącanie jonów metali w postaci elektrochemicznie nieaktywnych wodorotlenków, jednak jednocześnie wymusza stosowanie elektrod wykonanych z metali szlachetnych lub materiałów powlekanych. Stanowi to istotne obciążenie ekonomiczne procesu recyklingu. Jednym z podejść pozwalających na ograniczenie stosowania silnych kwasów jest prowadzenie elektrolizy zawieszinowej z wykorzystaniem rozpuszczalników głęboko eutektycznych [20].

5. Podsumowanie

Metody elektrochemiczne mogą stanowić istotne uzupełnienie, a w wybranych zastosowaniach również alternatywę, dla konwencjonalnych technologii recyklingu odpadów polimetalicznych, w tym ZSEiE. Szczególnie istotna jest ich wysoka selektywność oraz możliwość odzysku surowców krytycznych z frakcji o niskim udziale masowym, lecz wysokiej wartości materiałowej.

Pomimo ograniczonego stopnia wdrożeń przemysłowych, potencjał dalszego rozwoju tych technologii jest znaczący. Kierunki przyszłych prac powinny koncentrować się na optymalizacji parametrów procesowych, zwiększaniu selektywności wydzielania metali oraz ograniczaniu oddziaływania środowiskowego, m.in. poprzez integrację procesów elektrowydzielania z odnawialnymi źródłami energii. Takie podejście wpisuje się bezpośrednio w założenia gospodarki o obiegu zamkniętym oraz długoterminowe strategie bezpieczeństwa surowcowego.

6. Literatura

- [1] Ministerstwo Klimatu i Środowiska. (2024, 29 kwietnia). *Nowe rozporządzenie UE dot. surowców krytycznych – baze informacyjne i cele, zaproszenie na spotkanie informacyjne dot. projektów strategicznych oraz na konsultacje dla przedsiębiorców*. Dostęp online: <https://www.gov.pl/web/klimat/nowe-rozporzadzenie-ue-dot-surowcow-krytycznych>
- [2] International trade in critical raw materials. (2024). *Eurostat*. Dostęp online: <https://ec.europa.eu/eurostat/stat>

- tistics-explained/index.php?title=International_trade_in_critical_raw_materials (dostęp: 25 stycznia 2026).
- [3] Bhoi N. K., Patel M., Kamarapu S. K., Kushwaha P. (2025). Advancing sustainable electronic waste management: An overview of mechatronics solutions for health, environment, and recycling. *Chemosphere*, 383.
 - [4] The Global E-waste Monitor 2024. (2024). UNITAR. <https://ewastemonitor.info/the-global-e-waste-monitor-2024/> (dostęp 25 stycznia 2026).
 - [5] Ochrona środowiska 2024. (2024). Główny Urząd Statystyczny. <https://stat.gov.pl/obszary-tematyczne/srodowisko-energia/srodowisko/ochrona-srodowiska-2024,1,25.html> (dostęp 25 stycznia 2026).
 - [6] Chicardi E., Lopez-Paneque A., García-Orta V. H. G., Ferrer R. S., Gallardo J. M. (2025). Enrichment Methods for Metal Recovery from Waste from Electrical and Electronic Equipment: A Brief Review. *Metals*, 2. <https://doi.org/10.3390/met15020140>
 - [7] Hao J., Wang Y., Wu Y., Guo F. (2020). Metal recovery from waste printed circuit boards: A review for current status and perspectives. *Resources, Conservation and Recycling* 157, 104787. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2020.104787>
 - [8] Fornalczyk, A., Willner, J., Francuz, K., & Cebulski, J. (2013). E-waste as a source of valuable metals. *Archives of Materials Science and Engineering*, 63(2), 87–92.
 - [9] Cui J., Zhang L. (2008). Metallurgical recovery of metals from electronic waste: A review. *Journal of Hazardous Materials*, 158(2–3): 228–256. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2008.02.001>
 - [10] Wu C., Awasthi A. K., Qin W., Wei Liu W., Yang C. (2022). Recycling value materials from waste PCBs focus on electronic components: Technologies, obstruction and prospects. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 10(5): 2213–3437. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2022.108516>
 - [11] Understanding PCB Recycling. (2023). Genox Technology. https://www.genoxtech.com/en/news_i_understanding-pcb-recycling.html (dostęp 25 stycznia 2026). <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.12.151>
 - [12] Gurgul A., Szczepaniak W., Zabłocka-Malicka M. (2018). Incineration and pyrolysis vs. steam gasification of electronic waste. *Science of The Total Environment*, 624: 1119–1124. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.12.151>
 - [13] Udayakumar S., Muhammad Irfan Bin Abd Razak, Ismail S. (2022). Recovering valuable metals from Waste Printed Circuit Boards (WPCB): A short review. *Materials Today: Proceedings*, 66(5): 3062–3070. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.07.364>
 - [14] Fathima A., Tang J. Y. B., Giannis A., Ilankoon I. M. S. K., Chong M. N. (2022). Catalysing electrowinning of copper from E-waste: A critical review. *Chemosphere*, 298, 134340. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.134340>
 - [15] Chen J. P., Lim L. L. (2005). Recovery of precious metals by an electrochemical deposition method. *Chemosphere*, 60(10): 1384–1392. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2005.02.001>
 - [16] Kim K., Candeago R., Rim G., Raymond D., Park A. A., Su X. (2021). Electrochemical approaches for selective recovery of critical elements in hydrometallurgical processes of complex feedstocks. *iScience*, 24 (5): 102374. <https://doi.org/10.1016/j.isci.2021.102374>
 - [17] Kim S., Kim J., Kim S., Lee J., Yoon J. (2018). Electrochemical lithium recovery and organic pollutant removal from industrial wastewater of a battery recycling plant. *Environmental Science: Water Research and Technology*, 4(2): 175–182. <https://doi.org/10.1039/C7EW00454K>
 - [18] Almeida J., Craveiro R., Faria P., Silva A. S., Mateus E. P., Barreiros S., Paiva A., Ribeiro A. B. (2020). Electrodialytic removal of tungsten and arsenic from secondary mine resources — Deep eutectic solvents enhancement. *Science of The Total Environment*, 710, 136364. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.136364>
 - [19] Mohammad Y. A. Mollah, Paul Morkovsky, Jewel A. G. Gomes, Mehmet Kesmez, Jose Parga, David L. Cocke. (2004). Fundamentals, present and future perspectives of electrocoagulation. *Journal of Hazardous Materials*, 114 (1-3): 199–210. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2004.08.009>
 - [20] Liu K., Huang S., Jin Y., Ma L., Wang W-X., Lam J. C. (2022). A green slurry electrolysis to recover valuable metals from waste printed circuit board (WPCB) in recyclable pH-neutral ethylene glycol. *Journal of Hazardous Materials*, 433. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2022.128702>

Wydział Inżynierii Środowiska
Politechniki Wrocławskiej



Studia podyplomowe

TECHNOLOGIA I BEZPIECZEŃSTWO WODY

Przygotowanie i weryfikacja planów bezpieczeństwa wody, identyfikacja i ocena zagrożeń dostaw wody, dyrektywa wodna, technologie ujmowania, oczyszczania i dystrybucji wody, alternatywne źródła wody, zarządzanie systemami zaopatrzenia w wodę.

Informacje i rekrutacja: cku.pwr.edu.pl

Wydział Inżynierii Środowiska
Politechniki Warszawskiej



Studia podyplomowe

INŻYNIERIA GAZOWNICTWA

Projektowanie oraz komputerowe metody obliczania sieci gazowych. Techniczne problemy transportu, magazynowania, dystrybucji oraz użytkowania gazu. Nowe technologie w procesie dekarbonizacji gazownictwa. Energia słoneczna i wiatrowa. Gospodarka wodorowa (wytworzenie, transport, magazynowanie). Gospodarka biometanowa. Transport rurociągowy wodoru, mieszanin gazu ziemnego z wodorem/biometanem. Problemy rozliczania dostarczanych mieszanin gazu ziemnego z wodorem/biometanem. Technologie wychwyty oraz transportu rurociągowego dwutlenku węgla. Studia dwusemestralne.

Informacje i rekrutacja: irk.pw.edu.pl

Wody opadowe i ścieki szare – potencjał ponownego wykorzystania w budynkach

Rainwater and greywater – the potential for reuse in buildings

Katarzyna Umiejewska^{1*} , Maciej Malarski¹ , Katarzyna Miszta-Kruk¹ , Piotr Hładki¹ ,
Monika Żubrowska-Sudoł¹ 

¹ Wydział Inżynierii Środowiska, Politechnika Warszawska

* Kontakt / Correspondence: katarzyna.umiejewska@pw.edu.pl

Streszczenie:

Prezentowano zagadnienia związane z odzyskiem i ponownym wykorzystaniem wód opadowych i ścieków szarych w budynkach. W pierwszym etapie badań rozpoznano dostępne zasoby wód opadowych i ścieków szarych na podstawie obliczeń bilansowych dla typowego budynku mieszkalnego. Następnie wyznaczono stopień zmieszania tworzący ścieki szare. Drugim etapem badań było określenie rzeczywistej jakości wód opadowych i ścieków szarych. Na tej podstawie zaproponowano układy do ich podczyszczania. Pozwoli to na zastosowanie tych wód do powtórnego wykorzystania w budynkach.

Słowa kluczowe: wody opadowe, ścieki szare, gromadzenie, oczyszczanie, powtarne wykorzystanie

Abstract:

Issues related to the recovery and reuse of rainwater and graywater in buildings were presented. The first stage of the study identified available rainwater and graywater resources based on balance calculations for a typical residential building. On this basis, the actual degree of mixing that creates greywater was obtained. The next stage of the research was to determine the actual quality of rainwater and greywater and to propose systems for their pre-treatment, which will allow this water to be reused in buildings.

Keywords: rainwater, greywater, harvesting, treatment, reuse

1. Wstęp

Całkowite zasoby słodkiej wody dostępne w Polsce są stosunkowo niewielkie i charakteryzują się zmiennością sezonową i regionalną. Wynoszą one około 1600 m³ na osobę rocznie, co jest wartością poniżej poziomu stresu wodnego (1700 m³). W Europie tylko Czechy, Cypr i Malta mają mniejsze zasoby wodne niż Polska [1]. Średnie roczne opady w Warszawie w 2023 r. wyniosły 572,0 mm [2], w porównaniu z 656,2 mm w Polsce [3]. Opady deszczu w Polsce pozwalają na jego gromadzenie, oczyszczanie i ponowne wykorzystanie w gospodarstwach domowych. Zgodnie z polskim prawem, oprócz wykorzystania wody deszczowej (zbieranej np. z dachów) do nawadniania ogrodu, mycia dróg czy chodników możliwe jest również jej magazynowanie w celu ponownego wykorzystania w gospodarstwach domowych np. do spłukiwania toalet, prania i innych podobnych celów. Dostępne badania pokazują, że jakość wody deszczowej zależy między innymi od materiału, z którego wykonany jest dach, jego położenia

i wielkości, stężenia zanieczyszczeń chemicznych w otoczeniu i w wodzie deszczowej, a także pory roku [4]. Wykorzystanie wody opadowej w budynkach wymaga nie tylko odpowiedniej instalacji, ale również ich wstępnego oczyszczenia.

Drugim źródłem wody do ponownego wykorzystania w budynkach mogą być oczyszczone ścieki szare. Procentowy udział możliwych do zagospodarowania ścieków szarych stanowi około 75% ogólnej ilości ścieków z budynku [5]. Aby było to możliwe konieczne jest wykonanie dualnej instalacji zasilającej – osobno do wody przeznaczonej do spożycia i osobno do wody opadowej/ścieków szarych oraz systemu gromadzenia i oczyszczania.

Zarówno wody opadowe oraz oczyszczone ścieki szare stanowią alternatywne źródło wody w stosunku do wody pobieranej z sieci wodociągowej lub z ujęć lokalnych. Ich wykorzystanie pozwala na ograniczenie zużycia zasobów pierwotnych (wody powierzchniowe oraz wody podziemne) wpisując się w wyzwania zrównoważonej gospodarki wodnej. Przyczynia się również do zamykania obiegu wody w budynkach, stanowiąc istotny

element gospodarki o obiegu zamkniętym w sektorze budownictwem i wodociągowo-kanalizacyjnym. Potencjał wód opadowych i ścieków szarych stanowi podwaliny projektu badawczo-rozwojowego, którego celem jest opracowanie systemu gromadzenia oraz oczyszczania wód opadowych, roztopowych i ścieków szarych (HYDROSTRATEG-II/0020/2023). W artykule przedstawiono pierwsze etapy badawcze przedmiotowego projektu obejmujące:

- koncepcję oszacowania ilości wód opadowych i ścieków szarych oraz wielkości zbiornika do ich gromadzenia,
- analizę charakterystyki fizyko-chemicznej wód opadowych oraz ścieków szarych.

2. Oszacowanie ilości wód opadowych i wielkości zbiornika do ich gromadzenia

Zgodnie z polskimi przepisami, wody opadowe mogą być gromadzone w zbiornikach. Oszacowanie wielkości zbiornika wód opadowych i roztopowych, który przejmie cały opad w roku, należy wykonać na podstawie identyfikacji rzeczywistej ilości wód opadowych i roztopowych. W tym celu konieczna jest informacja dotycząca wielkości opadu, powierzchni, z której zbierano opad oraz zapotrzebowania na wodę. Do określenia wielkości opadu, można skorzystać z pakietu cyfrowych informacji o natężeniach deszczów miarodajnych – Polski Atlas Natężeń Deszczów – PANDa oraz ogólnodostępnych map klimatycznych Polski opracowanych przez IMGW – Państwowy Instytut Badawczy (IMGW-PIB). Dla obszaru Polski i wielolecia (1991–2020) uzyskano dane dotyczące rocznych sum opadów atmosferycznych. Tym sposobem powierzchnię kraju podzielono na rejony z określoną wielkością opadu wieloletniego, co pozwoliło na obliczenie pojemności zbiornika dla dowolnie zlokalizowanej inwestycji na terenie Polski.

Kolejnym etapem było określenie wielkości spływu z powierzchni dachu. W tym celu przeanalizowano metodologię obliczania wielkości spływu wody opadowej zawartą w normie [6]. Metodyka ta, została skonfrontowana z pomiarami rzeczywistej ilości uzyskanej wody opadowej w czasie trwania deszczy, na 7 wybranych dachach o znanej powierzchni. Obliczenia modelowe przeprowadzono uwzględniając 12 najczęściej występujących kształtów dachu wraz z elementami towarzyszącymi. Wielkości współczynników spływu przyjęto zgodnie z normą PN-92 B-01707 [7]. Z uwagi na zmienności opadów w zależności od lokalizacji inwestycji oraz różne konstrukcje i materiały pokrycia dachu (mające wpływ na obliczeniową powierzchnię dachu), stworzono zależności, które pozwalają na dobór odpowiedniej kubatury zbiornika na wody opadowe. Założono również, że wody opadowe będą przede wszystkim przeznaczone na cel spłukiwania misek ustępowych, co w rezultacie ma zapewnić redukcję zużycia wody wodociągowej przynajmniej o 20%. Pozostała objętość zgromadzonej wody opadowej i roztopowej, będzie mogła posłużyć na inne cele np. podlewanie zieleni. Rezultatem analiz było stworzenie nomogramu doboru zbiornika wód opadowych przy uwzględnieniu: powierzchni dachu, opadu średniorocznego oraz wymaganego zapotrzebowania na wodę uzależnionego od ilości użytkowników. Zagadnienie to będzie omówione w kolejnym artykule.

3. Oszacowanie ilości ścieków szarych i wielkości zbiornika do ich gromadzenia

W celu określenia wymaganej pojemności zbiornika ścieków szarych przeprowadzono analizę średniego zużycia oraz zapotrzebowania wody na cele bytowe w Polsce. Zgodnie z zapisami Rozporządzenia Ministra Infrastruktury z dnia 14 stycznia 2002 r. w sprawie określenia przeciętnych norm zużycia wody [8], średnie jednostkowe dobowe zapotrzebowanie na wodę w budynkach mieszkalnych zależy jest od wyposażenia lokali w urządzenia i zawiera się w przedziale $80\text{--}100\text{ dm}^3/(\text{M}\cdot\text{d})$ dla budynków z lokalnym systemem przygotowania ciepłej wody użytkowej oraz $140\text{--}160\text{ dm}^3/(\text{M}\cdot\text{d})$ dla budynków podłączonych do zbiorowego systemu ciepłowniczego. Na podstawie zapisów Rozporządzenia [9] oraz danych zaczerpniętych z literatury przyjęto średnie zapotrzebowanie na wodę w ilości $120\text{ dm}^3/(\text{M}\cdot\text{d})$. W celu rozpoznania dostępnych zasobów ścieków szarych przeprowadzono obliczenia bilansowe jednostkowej produkcji tych ścieków dla typowego budynku mieszkalnego w rozróżnieniu na urządzenia sanitarne (pralka, umywalka, wanna/prysznic). Analizując strukturę zużycia wody w gospodarstwach domowych zaprezentowaną np. przez Chudzieckiego [5] stwierdzono, że udział ścieków szarych wynosi 75,1% w całkowitej ilości ścieków. Struktura ścieków szarych przedstawia się następująco: ścieki z umywalki 8,3%, ścieki z wanny 54% i ścieki z prania 12,8%. Na spłukiwanie misek ustępowych wykorzystywane jest 20% ogólnego zużycia wody, tak więc oczyszczalne ścieki szare z powodzeniem mogą pokryć zapotrzebowanie na wodę do spłukiwania misek ustępowych.

4. Jakość wód opadowych

Jakość zebranej wody opadowej jest bardzo zmienna i zależy od rodzaju materiału z jakiego wykonano dach [9]. Poza rodzajem materiału, jakość gromadzonych z dachu wód opadowych zależy również od intensywności opadu, lokalizacji i wymiaru dachu, okresu roku, czasu trwania okresów suszy oraz ilość zanieczyszczeń wychwyconych z atmosfery lub wypłukanych z powierzchni zlewni [10]. Eksperymenty dla wód opadowych przeprowadzono dla strumieni zbieranych niezależnie z 7. dachów. Były to dachy: ceramiczny, ceramiczny z panelami PV, metalowy, blaszany, bitumiczny, z tworzywa PVC zlokalizowane w Warszawie i jej okolicach. Zakres analityczny obejmował określenie wartości następujących wskaźników: pH, przewodnictwo elektrolityczne, kwasowość ogólna, zasadowość ogólna barwa, mętność, chlorki, siarczany, żelazo ogólne, azotany (V), azotany (III), jon amonowy, utlenialność, ChZT, BZT₅, OWO, UV, ortofosforany, zawiesina ogólna. Przeprowadzono analizy jakości wód opadowych zebranych z różnych lokalizacji i różnych dachów. Wyniki jakości wody opadowej zebrane w Tabeli 1 potwierdziły wpływ lokalizacji i materiału, z którego wykonany jest dach na jakość zbieranej wody opadowej. Najwyższą zawartością związków organicznych (ChZT, utlenialność) oraz barwą cechowała się woda opadowa pobrana w Warszawie, na Białołęce. Należy jednak zauważyć, że na jakość wód nie wpływa jedynie lokalizacja, ponieważ wody opadowe z dachów zlokalizowanych w Józefowie miały zmienną zawartość związków organicznych. Najlepszej jakości wodę zgromadzono z dachu metalowego zlokalizowanego w Józefowie. Pobrano również wody opadowe z trzech różnych dachów

Tabela 1. Jakość wód opadowych w zależności od lokalizacji i materiału dachu
Table 1. Rainwater quality depending on location and roof material

Lokalizacja	Materiał dachu	pH	Przewodnictwo [μS/cm]	Barwa [mg/l]	Mętność [NTU]	Utlonialność [mg/l]	NO ₂ [mg/l]	NO ₃ [mg/l]	NH ₄ [mg/l]	ChZT [mg/l]
Warszawa Białoleka	Ceramiczny	5,94	87,74	118,00	5,94	8,00	0,05	0,70	0,96	28,50
Słpsk gm. Zabrodzie	Ceramiczny z panelami PV	6,04	32,10	112,00	8,11	7,20	0,02	0,20	0,67	25,50
Słpsk gm. Zabrodzie	Metalowy	5,82	35,31	69,00	4,17	7,36	0,01	0,38	1,20	22,20
Słpsk gm. Zabrodzie	Tworzywo PVC	5,85	26,75	75,00	5,34	6,40	0,01	0,29	1,26	18,90
Warszawa Józefów	Metalowy	6,18	50,29	37,00	2,48	2,40	0,02	0,40	0,47	6,76
Warszawa Józefów	Bitumiczny	6,51	54,57	50,00	3,88	4,64	0,02	0,28	0,54	17,60

Tabela 2. Wybrane wskaźniki jakości ścieków z wanny, umywalki, pralki i strumienia zmieszanego
Table 2. Selected quality parameters of wastewater from bathtubs, washbasins, washing machines and mixed flows

Miejsce poboru	pH	Przewodnictwo [μS/cm]	Mętność [NTU]	Utlonialność [mg/l]	BZT ₅ [mg/l]	ChZT [mg/l]	UV [cm ⁻¹]
Wanna	7,48	633	5,86	7,04	17,5	32,8	0,091
Umywalka	7,15	1081	54	28,4	98,7	286	0,363
Pralka	8,91	2260	705	188	609,8	2077	0,697
Ścieki zmieszane	7,72	948	85,4	33,6	–	–	0,219

zlokalizowanych w miejscowości Słpsk (ceramiczny z panelami PV, metalowy i dach z tworzywa PVC). Wody te znacząco różniły się jakością.

Z uwagi na jakość gromadzonych wód opadowych poddano je wstępnemu oczyszczaniu w procesach filtracji. Filtrację prowadzono z prędkością 5 m/h dla 5. różnych wypełnień: filtry włókninowe o wymiarach 1, 20 i 50 μm piasek 0,8–1,4 mm; antracyt 0,25–4 mm. Celem filtracji było przede wszystkim usunięcie z wody zawiesiny ogólnej i mętności. Wartości tych wskaźników, po filtracji, niezależnie od pochodzenia wody opadowej były mniejsze od odpowiednio: 15 mg/l i 10 NTU.

5. Jakość ścieków szarych

Jakość surowych ścieków szarych oceniano poprzez określenie wartości następujących wskaźników: pH, przewodnictwo elektrolityczne, kwasowość ogólna, zasadowość ogólna barwa, mętność, chlorki, siarczany, żelazo ogólne, azotany (V), azotany (III), jon amonowy, utlenialność, ChZT, BZT₅, OWO, UV, ortofosforany, zawiesina ogólna. Przeprowadzone badania jakości trzydziestu prób, wykazały, że skład ścieków szarych jest bardzo zmienny. W tabeli 2 przedstawiono wyniki przykładowej serii badawczej obejmującej strumienie ścieków z wanny, umywalki i pralki oraz strumienia zmieszanego.

Analiza jakości fizyko-chemicznej ścieków szarych wskazuje, że wymagają one procesów oczyszczania przed ich powtórny wykorzystaniem w budynkach. Zastosowano procesy: filtracji, koagulacji objętościowej i dezynfekcji.

Filtrację ścieków szarych prowadzono przy prędkości 5 m/h dla 9 różnych wypełnień filtrów: siatkowe o wymiarach 50, 100, 150 μm; sznurkowe 20, 50, 100 μm; włókninowe 20, 50 μm; piasek 0,8–1,4 mm. Dla strumieni ścieków szarych przeprowadzono 30 eksperymentów filtracji. Proces filtracji nie dawał zadowalających

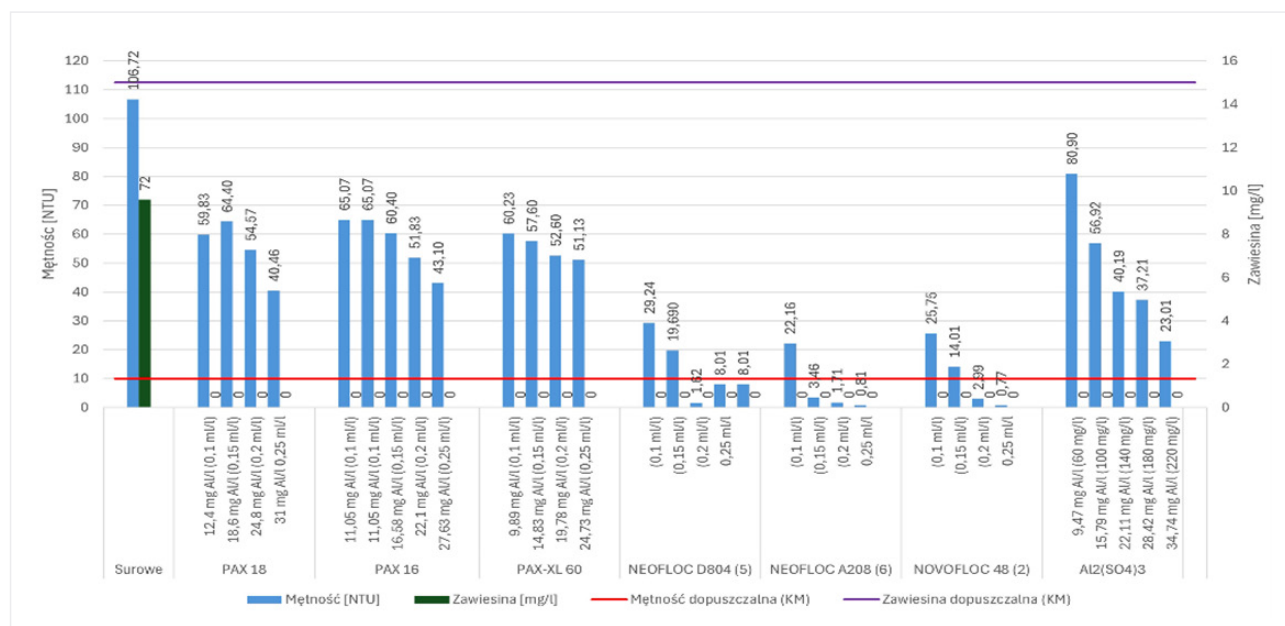
rezultatów. Jest on jednak istotny, gdyż pozwala na wstępne oczyszczenie ścieków szarych przed kolejnymi procesami technologicznymi. Dodatkowo przeprowadzono eksperymenty mające na celu porównanie różnych wypełnień pod kątem ich efektywnego czasu pracy. Na ich podstawie wytypowano filtr sznurkowy i piaskowy jako etap wstępnego podczyszczania przed koagulacją objętościową i dezynfekcją (zapewniając zarówno redukcję wskaźników zanieczyszczeń, oraz pozwalając na dłuższy czas pracy).

Badania nad procesem koagulacji objętościowej rozpoczęto od sprawdzenia skuteczności działania 20 koagulantów. W eksperymentach analizowano różne dawki koagulantów oraz różne czasy trwania szybkiego i wolnego mieszania. Na ich podstawie wybrano 7 koagulantów, dla których przeprowadzono po 3 eksperymenty dla dawek w zakresie 0,1–0,25 ml/l. Po procesie koagulacji objętościowej realizowano proces sedymentacji (t=10 min) oraz filtracji pospiesznej (v=5 m/h). Zmniejszenie mętności i stężenia zawiesiny poniżej wartości odpowiednio 15 mg/l i 10 NTU uzyskano dla 3 koagulantów (Rys.1).

Na podstawie przeprowadzonych badań wyciągnięto wniosek, że proces koagulacji objętościowej powinien być jednym z procesów jednostkowych przed procesem dezynfekcji. Szczegółowe omówienie wyników prac badawczych nad oczyszczaniem ścieków szarych będzie przedmiotem kolejnego artykułu.

6. Podsumowanie

Pierwszy etap realizacji projektu potwierdził wysoki potencjał wód opadowych oraz ścieków szarych jako alternatywnych źródeł wody w budynkach. Wykazano, że modelowanie matematyczne daje możliwość wiarygodnej predykcji z jednej strony ich ilości, z drugiej zapotrzebowania na wodę z uwzględnieniem różnego sposobu jej wykorzystania. Na podstawie wyników analizy



Rys. 1. Mętność i zawiesina ścieków szarych przed i po koagulacji
 Fig. 1. Turbidity and suspended solids in grey wastewater before and after coagulation

fizyko-chemicznej wytypowano jednostkowe procesy oczyszczania, które będą weryfikowane empirycznie, oraz zaplanowano eksperymenty mające na celu określenie wpływu gromadzenia wód opadowych oraz ścieków szarych na ich jakość. Dalsze prace badawcze obejmować będą również: i) porównanie efektywności różnych metod dezynfekcji (chlorowanie przy wykorzystaniu chlorynu I sodu, ozonowanie i promieniowanie UV), ii) porównanie podatności różnych strumieni ścieków szarych na rozkład biologiczny oraz iii) monitoring zawartości mikroplastików w ściekach szarych oraz wodach opadowych.

Rezultatem projektu będzie opracowanie systemu gromadzenia i oczyszczania wód opadowych, roztopowych i ścieków szarych, charakteryzującego się prostotą, łatwością obsługi a zarazem wysoką niezawodnością.

Badania realizowano w ramach projektu HYDROSTRATEG-II/0020/2023 Innowacyjny system gromadzenia wód opadowych, roztopowych i ścieków szarych wraz z procesami ich oczyszczania (ISGWORS).

7. Bibliografia

- [1] Polska na drodze zrównoważonego rozwoju. Raport 2020. (2020). Główny Urząd Statystyczny. Dostęp online <https://raportsdg.stat.gov.pl/2020/cel6.html>
- [2] VarsoviaKlimat. Charakterystyka wybranych elementów klimatu w Warszawie w 2023 roku. Dostęp online: <https://varsoviaklimat.pl/?p=1369>
- [3] IMGW – Państwowy Instytut Badawczy. Charakterystyka wybranych elementów klimatu w Polsce w 2023 roku – podsumowanie. Dostęp online: <https://archiwum.imgw.pl/wydarzenia/charakterystyka-wybranych-elementow-klimatu-w-polsce-w-2023-roku-podsumowanie>
- [4] Mazurkiewicz, K., Jeż-Walkowiak, J., & Michałkiewicz, M. (2022). Physicochemical and microbiological quality of rainwater harvested in underground retention tanks. *Science of the Total Environment*, 814, 152701. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.152701>
- [5] Chudzicki, J., & Sosnowski, S. (2009). *Instalacje wodociągowe, projektowanie, wykonanie, eksploatacja*. Wydawnictwo Seidel-Przywecki.
- [6] PN-EN 12056-3:2002. Systemy kanalizacji grawitacyjnej wewnątrz budynków. (2002).
- [7] Polski Komitet Normalizacyjny. PN-92 B-01707. Instalacje kanalizacyjne. (1992). Polski Komitet Normalizacyjny.
- [8] Rozporządzenie Ministra Infrastruktury z dnia 14 stycznia 2002 r. w sprawie określenia przeciętnych norm zużycia wody. (2002). *Dziennik Ustaw*, Nr 8, poz. 70.
- [9] Lee, J. Y., Bak, G., & Han, M. (2012). Quality of roof-harvested rainwater—comparison of different roofing materials. *Environmental Pollution*, 162, 422–429. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2011.12.005>
- [10] Hamilton, K. A., Parrish, K., Ahmed, W., & Haas, C. N. (2018). Assessment of water quality in roof-harvested rainwater barrels in greater Philadelphia. *Water*, 10(11), 92. <https://doi.org/10.3390/w10020092>

ERRATA:

W tytule artykułu autorstwa Moniki Humaj, Jerzego Mikosza i Gian Francesco Meloniego (DOI: 10.65545/GWITS.2026.01.05, GWiTS 1/2026) wystąpiła pomyłka redakcyjna. Jest: „Mikrobiologiczne ogniwa paliwowe: ewolucja technologii i perspektywy jej wykorzystania sanitarna”. Poprawny tytuł artykułu brzmi: „Mikrobiologiczne ogniwa paliwowe: ewolucja technologii i perspektywy jej wykorzystania”.

Przepraszamy za zaistniałą pomyłkę. Występuje ona wyłącznie w wersji drukowanej czasopisma. Wersja dostępna na stronie internetowej czasopisma została skorygowana.

Zmarzlina suwalska i klatraty metanu jako klucz do genezy biegunowych czap lodowych

The Suwałki permafrost and methane clathrates as a key to the genesis of polar ice caps

Witold Paleczek^{1*} 

¹ Wydział Budownictwa, Politechnika Częstochowska

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

Streszczenie:

Zaproponowany model redefiniuje genezę zmarzliny jako dynamicznego układu gazowo-hydrologicznego. Oparty jest na rozprężeniowych mechanizmach solanek i metanu. Proponowany mechanizm rozprężeniowego chłodzenia w kapilarach kliważu wyjaśnia formowanie klatratów metanu i lokalne zamarzanie wody w górotworze, co umożliwia reinterpretację zmarzliny suwalskiej jako struktury o potencjalnie endogenicznym pochodzeniu. Rozszerzeniem modelu jest hipoteza genezy biegunowych czap lodowych, w której kluczową rolę odgrywa synergiczne oddziaływanie solanek niskotemperaturowych, gazów pod ciśnieniem oraz lokalnych anomalii magnetycznych. Model ten otwiera nowe pole interpretacji zlodowaceń. Rozległe strefy lodowe mogły powstawać jako rezultat synergii procesów gazowo-hydrologicznych i magnetycznych, niezależnie od zmian klimatycznych.

Słowa kluczowe: zmarzlina, rozprężanie solanek, klatraty metanu, chłodzenie hydrogeochemiczne, zlodowacenia endogeniczne

Abstract:

The proposed model redefines the genesis of permafrost as a dynamic gas-hydrological system. It is based on decompression-driven mechanisms involving brines and methane. The suggested process of decompression-induced cooling within cleavage capillaries accounts for the formation of methane clathrates and the localized freezing of water within the rock mass, enabling a reinterpretation of the Suwałki permafrost as a structure potentially of endogenic origin. An extension of the model is a hypothesis concerning the formation of polar ice caps, in which a key role is played by the synergistic interaction of low-temperature brines, pressurized gases, and local magnetic anomalies. This model opens a new field for interpreting glaciation processes. Extensive ice-covered regions may have developed as a result of the synergy between gas-hydrological and magnetic processes, independent of climatic changes.

Keywords: permafrost, brine decompression, methane clathrates, hydrogeochemical cooling, endogenic glaciations

1. Wprowadzenie

W głębokich partiach górotworu obecność solanek o wysokim stężeniu soli nieorganicznych obniża temperaturę krzepnięcia wody, umożliwiając utrzymanie fazy ciekłej poniżej 0°C. Najczęściej spotykane roztwory NaCl, CaCl₂ i MgCl₂ osiągają minimalne temperatury krzepnięcia (punkty eutektyczne) odpowiednio -21°C (~21%), -50°C (~44%) i -33°C (~27%) zgodnie z danymi przedstawionymi w [1]. Niezależnie od stopnia hydratacji soli, solanki NaCl, CaCl₂ i MgCl₂ zamarzają w zakresie od ok. -2°C (słone wody oceaniczne) do -50 oC (np. roztwór CaCl₂) co oznacza, że w sprzyjających warunkach termodynamicznych stano-

wią efektywny czynnik chłodzący górotwór. W mikrostrukturach górotworu, zwłaszcza w kapilarach kliważowych, sprzyjają one migracji cieczy, procesom dekompresyjnym oraz formowaniu klatratów gazowych (np. CH₄·nH₂O). Zjawiska te mogą prowadzić do odwrócenia lokalnego gradientu cieplnego i stabilizacji układów chłodzących w strefach głębokiego oddziaływania gazowo-hydrologicznego.

W pracy podjęto próbę wyróżnienia następujących zagadnień:

- przesunięcie akcentu z klasycznego modelu infiltracyjnego na gazowo-fazowy, w którym klatraty metanu, gazy rozpuszczone i mikroorganizmy metanotroficzne stają się kluczowymi komponentami hydrologii krasowej,

- włączenie klatratów metanu jako rezerwuarów gazowych stabilizujących skład chemiczny i dynamikę wypływu, rozumianego jako naturalne wydostawanie się wód i gazów z głębokich stref górotworu do powierzchni lub do stref przypowierzchniowych, kontrolowane przez ciśnienie, temperaturę oraz strukturę szczelinową skał,
- interpretację gazów (CH₄, CO₂, H₂S) jako wskaźników głębokiego zasilania i izolacji (w artykule określenie interpretacja gazów odnosi się do analizy ich składu, proporcji i pochodzenia jako wskaźników procesów fizykochemicznych zachodzących w głębokich strefach górotworu),
- zastosowanie mikroorganizmów metanotroficznych jako biologicznych markerów głębokiego zasilania,
- integrację fizyki fazowej z geochemią i hydrologią (tworzenie i rozpad klatratów jako mechanizmy regulujące wpływ),
- propozycję interdyscyplinarnego języka opisu górotworu, w którym woda, gaz i skała są współzależnymi komponentami,
- model chłodzenia głębi przez dekompresję cieczy niskotemperaturowych: zakłada istnienie zbiornika wodnego podgrzewanego magmą, z którego ciecz wtłaczana jest pod ciśnieniem do wyżej położonych stref; dekompresja prowadzi do spadku temperatury, lokalnego zamarzania i powstania zmarzliny [2],
- rola magnetytu (Fe₃O₄) jako naturalnego bufora redoks i źródła lokalnych anomalii magnetycznych, stabilizujących procesy krystalizacji wody i sprzyjających powstawaniu stref lodowych,
- hipoteza genezy biegunowych czap lodowych jako efektu synergii solanek niskotemperaturowych, gazów pod ciśnieniem oraz oddziaływania magnetyzmu ziemskiego, co pozwala tłumaczyć utrzymywanie się lodu niezależnie od klimatycznego mrozu,
- opis „efektu dezodorantu” – rozprężeniowego chłodzenia cieczy nasyconych gazami, prowadzącego do gwałtownego spadku temperatury i lokalnego zamarzania wody, stanowiącego kluczowy mechanizm w modelu głębokiej zmarzliny.

Proponowany model stanowi alternatywę wobec klasycznej interpretacji zmarzliny jako reliktu zlodowacenia i może potencjalnie tłumaczyć anomalie termiczne obserwowane m.in. w rejonie Suwalszczyzny, co wymaga dalszych badań terenowych. W efekcie dekompresji solanek (np. CaCl₂) może dochodzić do lokalnego zamarzania wody – mechanizmu chłodzenia niezależnego od klimatycznego zlodowacenia. Mieszanina solanek CaCl₂, MgCl₂ i NaCl wykazuje silniejszy efekt obniżenia temperatury krzepnięcia niż pojedyncze roztwory, co czyni ją skutecznym czynnikiem chłodzącym w głębokich systemach hydrotermalnych. Dodatkowo rozpuszczanie struktur solnych jako proces endotermiczny sprzyja lokalnemu ochłodzeniu górotworu. Roztwór niskotemperaturowy (np. CaCl₂, –50°C) pełni funkcję chłodziwa w modelu głębokiej zmarzliny, co ilustruje Tabela 1.

2. Samozamrożenie górotworu w wyniku rozprężenia solanek

Zjawisko quasi-sprężystości cieczy, wynikające z obecności rozpuszczonych w solankach gazów, których pęcherzyki nadają

sprężystość medium z natury niesprężystemu, można zilustrować na przykładzie solanek niskotemperaturowych o punkcie krzepnięcia sięgającym około –50°C. W warunkach górotworu solanki takie, poddane wysokiemu ciśnieniu, zachowują się jak medium sprężone, zdolne do gwałtownego rozprężania przy wyjściu z kapilar. Efekt ten przypomina mechanizm chłodzenia znany z aerozoli: rozprężająca się ciecz powoduje lokalne obniżenie temperatury nawet do kilkunastu stopni poniżej zera. Tak długo, jak trwa dopływ solanki przez kapilary, tak długo utrzymuje się stan chłodzenia zbiornika, prowadząc do samozamrożenia fragmentu górotworu wraz z wodą w jego sąsiedztwie. W rezultacie zmarzlina może stopniowo zwiększać swój zasięg. Solanki niskotemperaturowe mogą funkcjonować w cyklu obiegu zamkniętego, wypychane przez ciepło magmy (ok. +1200°C), przy czym rozprężeniu sprzyja obecność gazów rozpuszczonych pod ogromnym ciśnieniem. Woda obecna w porach skalnych ulega zamarzaniu mimo podwyższonego ciśnienia, podczas gdy same solanki pozostają w stanie ciekłym dzięki swemu niskotemperaturowemu charakterowi. Mechanizm ten tłumaczy możliwość powstawania lokalnych stref lodowych w górotworze, co ma istotne znaczenie dla interpretacji procesów geotermicznych i hydrogeologicznych.

Zjawisko to może występować również w rejonach okółobiegunowych, gdzie pokrywa lodowa nie musi powstawać wyłącznie wskutek działania mrozu atmosferycznego, lecz także w wyniku efektu swoistej „chłodziarko-zamrażarki geomechaniczno-chemicznej”. Tłumaczy to obecność stref występowania pokładów metanu (CH₄) o zwiększonych ilościach w tych obszarach świata.

Tabela 1. Elementy modelu chłodzenia i zamarzania wody w górotworze i przy dnie zbiorników wodnych, Źródło: opracowanie własne
Table 1. Components of the water cooling and freezing model in the rock mass and at the bottom of aquatic reservoirs, Source: authors' own study

Element	Opis
Zbiornik głęboki	Podgrzewany magmą (~1200°C): źródło pary, gazów i cieczy
Kapilary kliważowe	Kanały transportu cieczy, pary i gazów pod wysokim ciśnieniem
Roztwór niskotemperaturowy	CaCl ₂ (–50°C), MgCl ₂ (–33°C), NaCl (–21°C); mieszaniny wzmacniają efekt obniżenia temperatury krzepnięcia
Gazy rozpuszczone	CH ₄ , CO ₂ , H ₂ S pod wysokim ciśnieniem; nadają cieczy quasi-sprężystość i sprzyjają rozprężeniu
Mechanizm chłodzenia	Dekompresja przy wypływie z kapilary → gwałtowne ochłodzenie → lokalne zamarzanie wody
Proces endotermiczny	Rozpuszczanie struktur solnych dodatkowo obniża temperaturę górotworu
Efekt geologiczny	Powstanie zmarzliny (<i>permafrost</i>) bez udziału lodowca; lokalne strefy lodowe w górotworze
Konsekwencje hydrogeologiczne	Stabilizacja klatratów metanu, zmiana lokalnego gradientu cieplnego, potencjalne rezerwuary gazowe

3. Woda i gazy jako aktywne komponenty dynamicznych układów ciśnieniowych w strukturach skalnych

Woda, choć często traktowana jako neutralny nośnik, jest aktywnym medium geochemicznym – przenosi sole, gazy, energię oraz ‘zapis chemiczny skał’. W głębokich systemach krasowych i geotermalnych jej rola wykracza poza transport: uczestniczy w przemianach fizykochemicznych, katalizuje reakcje i kształtuje lokalną równowagę chemiczną. Rozpuszczone gazy – me-

tan (CH₄), dwutlenek węgla (CO₂) i siarkowodór (H₂S) – pełnią funkcję stabilizatorów wpływów, inicjują procesy mineralizacji, wpływają na pH oraz regulują równowagę redoks systemu. Równowaga redoks w górotworze nie jest abstrakcyjnym „zbiorem parametrów”, lecz realnym mechanizmem regulującym przemiany chemiczne i cieplne. W rejonie Suwalszczyzny, gdzie na dużych głębokościach występują złoża magnetytu (Fe₃O₄), układ Fe²⁺/Fe³⁺ pełni rolę naturalnego bufora oksydacyjno-redukującego. Obecność solanek niskotemperaturowych, nasyconych gazami (CH₄, CO₂, H₂S), wzmacnia ten efekt: pęcherzyki gazowe nadają cieczy quasi-sprężystość, a ich rozprężenie prowadzi do gwałtownego chłodzenia – jak już wspomniano: mechanizmu analogicznego do „efektu dezodorantu”. Woda w porach skalnych ulega zamarzaniu mimo podwyższonego ciśnienia, podczas gdy solanki pozostają ciekłe dzięki obniżonemu punktowi krzepnięcia. Solanki te posiadają odrębny obieg hydrogeologiczny, który dzięki skomplikowanej układowi szczelin w klaważu nie miesza się z wodami słodkimi. W rezultacie nie dochodzi do zaburzeń reżimu wód górotworu, a system solankowy zachowuje izolację chemiczną i termiczną. W takim układzie równowaga redoks stabilizuje zarówno fazy żelaza, jak i obecność gazów, tworząc środowisko sprzyjające powstawaniu lokalnych stref lodowych. Magnetyt, jako minerał o mieszanym stopniu utlenienia, rejestruje i utrzuwa warunki redoks, stanowiąc geochemiczny dowód izolacji i stabilności systemu. Powiązanie zmarzliny suwalskiej z równowagą redoks i rozprężeniem solanek pokazuje, że chłodzenie górotworu może być procesem endogenicznym, niezależnym od klimatycznego zlodowacenia, a jednocześnie zgodnym z obserwowanymi anomaliami termicznymi w regionie. Ich obecność i dynamika zależą od ciśnienia, temperatury oraz mikrostruktury górotworu, stanowiąc cenne wskaźniki głębokiej aktywności geochemicznej. Szczególną rolę w analizie proponowanego modelu odgrywają klatraty metanu – krystaliczne struktury lodowe z uwiecznionymi pęcherzykami CH₄. Ich występowanie świadczy o izolacji, stabilności termicznej i zachowaniu pierwotnych parametrów chemicznych. W połączeniu z reliktowymi wpływami, anomaliami chemicznymi oraz obecnością mikroorganizmów metanotroficznych, stanowią punkt odniesienia w redefinicji modeli hydrologii głębokiej. Artykuł analizuje rolę gazów w systemach wodnych jako czynników sprawczych i kontrolnych procesów geochemicznych. Interakcje woda-gaz, regulowane przez ciśnienie i temperaturę, determinują dynamikę głębokich układów hydrogeologicznych [3–7]. Tabela 2 zestawia wybrane zagadnienia z literatury, uporządkowane tematycznie zgodnie z argumentacją w tekście.

4. Hipoteza czap lodowych a magnetyzm ziemski

Pole magnetyczne Ziemi nie jest wyłącznie tarczą chroniącą planetę przed wiatrem słonecznym. W głębokiej geochemii może ono oddziaływać na strukturę wody i solanek, modulując ich właściwości fizykochemiczne. Badania laboratoryjne wskazują, że pola magnetyczne wpływają na proces krystalizacji wody i roztworów solnych, zmieniając stopień przechłodzenia oraz inicjację krzepnięcia. W rejonach okołobiegunowych, gdzie występują solanki niskotemperaturowe i gazy rozpuszczone pod ciśnieniem, lokalne warunki magnetyczne mogą sprzyjać stabilizacji stref lodowych – niezależnie od klimatycznego mrozu. Mechanizm ten można interpretować jako efekt synergii: rozprę-

żenie solanek nasyconych gazami (efekt rozprężeniowy: „efekt dezodorantu”), równowaga redoks stabilizowana przez minerały żelaza oraz lokalne anomalie magnetyczne wspólnie tworzą środowisko sprzyjające powstawaniu i utrzymywaniu czap lodowych. Szczególną rolę odgrywa magnetyt (Fe₃O₄), obecny w górotworze na dużych głębokościach. Jako minerał o mieszanym stopniu utlenienia pełni funkcję naturalnego bufora redoks, a jednocześnie generuje lokalne anomalie magnetyczne. To może tłumaczyć, dlaczego w niektórych miejscach lód utrzymuje się w sposób „nadmiarowy” względem samej temperatury atmosferycznej. Hipoteza ta sugeruje, że czapy lodowe na biegunach mogą być nie tylko efektem klimatycznego chłodzenia, lecz także wynikiem procesów endogenicznych – geochemiczno-magnetycznych – zachodzących w głębi Ziemi. Analiza prac [8–11] wskazuje na bardzo dobrą korelację między obecnością czap lodowych w obrębie biegunów magnetycznych a oddziaływaniem magnetyzmu ziemskiego na zwiększenie krzepnięcia wody i jej roztworów. Jest to propozycja nowa, gdyż literatura naukowa dotychczas nie wspomina o bezpośrednim powiązaniu magnetyzmu ziemskiego z genezą czap lodowych.

Tabela 2. Tematyczne zestawienie wybranych źródeł literaturowych, Źródło: opracowanie własne
Table 2. Thematic overview of selected literature sources, Source: authors' own study

Źródło	Zakres i znaczenie
Otero, 2020 [8]	Wpływ oscylujących pól magnetycznych na przechłodzenie i krzepnięcie wody oraz roztworów NaCl
Jarulertwattana, 2019 [9]	Oddziaływanie pola magnetycznego na szybkość krzepnięcia i przejście fazowe wody dejonizowanej
Urbic, 2023 [12]	Stabilizacja sieci wodorowej wody przez pole magnetyczne; symulacje krystalizacji
Appelo, 2023 [4]	Hydrogeochemia, wpływ CO ₂ na pH i rozpuszczalność; modele geochemiczne dla środowisk skalnych
Aeschbach, 2013 [3]	Gazy szlachetne jako wskaźniki paleotemperatur i izolacji hydrogeologicznej
PIG, 2025 [10, 13]	Zmarzlina w Suwałkach jako przypadek głębokiej izolacji i chłodzenia rozprężeniowego
Carrol, 2020 [14]	Struktura i kontrola klatratów metanu; równowaga fazowa w systemach gazowo-wodnych
Sander, 2015 [15]	Rozpuszczalność gazów jako funkcja temperatury i ciśnienia; równowaga gaz-ciecz
Kvenvolden, 1988 [16]	Klatraty metanu jako rezerwuary węgla; relikтовая izolacja geochemiczna
Rouwet, 2020 [17]	Źródła gazowe w systemach hydrotermalnych; migracja CO ₂ i H ₂ S
Li, 2025 [18]	Mikroorganizmy metanotroficzne jako biologiczne wskaźniki głębokiego zasilania
Buffett, 2004 [19]	Stabilność klatratów metanu; funkcja bufora gazowego
Longone, 2024 [20]	Mikroskopowe mechanizmy stabilizacji klatratów CH ₄ i CO ₂ ; przemiany fazowe
Sloan, 2007 [21]	Struktura, powstawanie i destabilizacja klatratów; równowaga fazowa i kinetyka
Max, 2009 [22]	Klatraty jako archiwum geotermalne; koncepcja „pamięci gazowej”
Paleczek, 2025 [2]	Alternatywny mechanizm zasilania wód słodkich; integracja geotermii, gazów (CO ₂), endotermicznych reakcji chemicznych i transportu pary wodnej w szczelinach klaważowych; propozycja rewizji klasycznego cyklu hydrologicznego i genezy źródeł krasowych

Zagadnienia mikrobiologii głębokich systemów geotermalnych zostały szeroko omówione w [23, 24], natomiast modelowanie klatratów w ujęciu dwuwymiarowym przedstawiono w [25].

5. Mechanizmy fizykochemiczne i rozpuszczalność gazów

W głębokich systemach wodnych gazy są czynnikami sprawczymi, współkształtującymi dynamikę wypływu, skład chemiczny i parametry geochemiczne środowiska skalnego. Ich działanie zależy od temperatury, ciśnienia, struktury porowej skał oraz obecności wody w różnych stanach skupienia. Rozpuszczalność gazów zmienia się wraz z warunkami fizycznymi: w środowisku powierzchniowym wzrost temperatury obniża rozpuszczalność (np. CO_2 , CH_4), sprzyjając uwalnianiu, natomiast w głębokich strefach przy wysokim ciśnieniu zależność ta może ulec odwróceniu:

- CO_2 może być wypierany z roztworu, inicjując mineralizację (np. kalcyt),
- CH_4 może stabilizować się w formie klatratów, wpływając na wypływ i obecność mikroorganizmów metanotroficznych.

6. Klatraty metanu i separacja CO_2

Klatraty metanu – struktury lodowe z uwięzionym CH_4 – powstają w warunkach wysokiego ciśnienia i niskiej temperatury, typowych dla głębokich szczelin krasowych i basenów osadowych. Ich obecność świadczy o izolacji systemu, stabilności termicznej i ciśnieniowej oraz zachowaniu pierwotnych parametrów geochemicznych. Rozpad klatratów, np. wskutek wzrostu temperatury, może prowadzić do nagłego uwolnienia metanu i zakłócenia równowagi chemicznej wypływu. W procesie kondensacji pary wodnej dochodzi do selektywnej separacji gazów. CO_2 , jako gaz dobrze rozpuszczalny, może być zatrzymywany lub wypierany w zależności od lokalnych warunków, wpływając na:

- zmiany pH i mineralizację (np. węglany),
- reakcje endotermiczne stabilizujące temperaturę,
- skład chemiczny wód źródłanych, niezależny od infiltracji atmosferycznej [5, 15, 16].

Rozpuszczanie CO_2 w wodzie jest procesem endotermicznym, który lokalnie pochłania ciepło z otoczenia, co prowadzi do stabilizacji temperatury w strefie reakcji.

7. Zjawiska obserwowalne: wypływy gazowe i stabilność źródeł

Wypływy gazowe są nie tylko obiektem obserwacji geochemicznej, lecz także wskaźnikiem głębokich procesów fizykochemicznych i biologicznych, nieuwzględnianych w klasycznych modelach hydrologicznych. Mogą wskazywać na alternatywne mechanizmy zasilania i stabilizacji, niezależne od infiltracji atmosferycznej. Mofety, źródła siarkowe i wody mineralne ujawniają gaz w postaci pęcherzyków, zmętnień, zapachów i lokalnych zmian chemicznych. Skład (CO_2 , H_2S , CH_4) odzwierciedla warunki głębokie – ciśnienie, temperaturę i reaktywność skał – i może świadczyć o:

- aktywności magmowej lub hydrotermalnej,
- redukcji siarczanów i fermentacji metanowej,
- strefach separacji gazów związanych z kondensacją pary wodnej.

Wypływ gazu jest elementem systemowym, odzwierciedlającym parametry środowiska skalnego. Stabilność wielu źródeł mimo zmiennych warunków atmosferycznych może wynikać z:

- reakcji endotermicznych (np. tworzenia kwasu węglowego),
- chłodzenia kapilarnego w szczelinach,
- obecności klatratów kontrolujących uwalnianie gazu.

Klatraty, jako stabilne struktury lodowe wiążące cząsteczki gazów, mogą okresowo blokować lub ograniczać ich migrację, a ich rozpad prowadzi do impulsowego uwalniania gazu.

Źródło działa wówczas jako system samoregulujący, oparty na warunkach geologicznych.

8. Mikroorganizmy metanotroficzne jako wskaźniki

Obserwowane w niektórych źródłach mikroorganizmy metanotroficzne świadczą o:

- długotrwałej obecności CH_4 ,
- izolacji biologicznej i chemicznej głębokich stref krasowych,
- reliktowym charakterze ekosystemu.

Stanowią biologiczne wskaźniki głębokiego zasilania – zastosowanie mikroorganizmów *metanotroficznych* (np. *Methylococcus capsulatus*, *Methylosinus trichosporium*) jako biologicznych markerów głębokiego zasilania, można traktować jak żywe rejestry procesów zachodzących poza klasycznymi modelami hydrologicznymi, [11, 18, 23, 24].

Modelowanie i implikacje: zjawiska gazowe w systemach krasowych nie są zjawiskiem wtórnym, lecz aktywnie uczestniczą w mechanizmach zasilania, separacji i stabilizacji wód. Ich obecność otwiera możliwość modelowania hydrologii głębokich stref w ujęciu wykraczającym poza tradycyjne modele infiltracyjne, [2].

9. Klatraty jako bufor gazowy

Klatraty metanu – struktury lodowe z uwięzionym gazem – mogą działać jako naturalny bufor regulujący ciśnienie, temperaturę i skład chemiczny wypływu. W szczelinach krasowych mogą:

- stabilizować wypływ poprzez kontrolowane uwalnianie metanu,
- chronić system przed nagłymi zmianami ciśnienia,
- inicjować aktywność mikroorganizmów metanotroficznych,
- wpływać na pH i mineralizację poprzez interakcje z CO_2 i jonami węglanowymi.

W modelu geotermalno-krasowym klatraty funkcjonują jako dynamiczny rezerwuar gazowy reagujący na zmiany ciśnienia i temperatury.

10. Zjawiska gazowe jako wskaźniki zasilania

Skład gazów w wypływach odzwierciedla głębokie warunki geochemiczne:

- obecność CH_4 w formie klatratów sugeruje izolację systemu,
- stabilne stężenie CO_2 wskazuje na reakcje endotermiczne,
- H_2S świadczy o redukcji siarczanów w warunkach beztlenowych.

11. Wpływ gazów na wodę słodką

Rozpuszczone lub uwięzione gazy wpływają na migrację, separację jonów oraz stabilność termiczną i chemiczną wypływu:

- CO₂ inicjuje mineralizację i zmienia skład wody,
- CH₄ oddziałuje na mikrobiologię systemu, stabilizując jego parametry,
- separacja gazów podczas kondensacji prowadzi do rozdziału faz i zmiany składu chemicznego.

Gaz pełni więc aktywną rolę w kształtowaniu właściwości fizykochemicznych wód słodkich [7, 19, 20].

12. Przestrzenie dalszego rozpoznania

Prezentowany model ma charakter eksploracyjny: polega na formułowaniu pytań kwestionujących ustalone, dominujące sposoby interpretacji i wskazujących potrzebę rozszerzenia metod opisu procesów geochemicznych i hydrologicznych. Wymagają one pogłębionej analizy teoretycznej, modelowania fizykochemicznego i weryfikacji terenowej:

- Czy istnieją źródła, w których klatraty metanu aktywnie uczestniczą w cyklu hydrologicznym, regulując parametry wypływu?
- Jakie cechy górotworu (porowatość, szczelinowość, obecność soli, typ litologiczny) sprzyjają powstawaniu i trwałości klatratów? Czy ich rozpad może być inicjowany przez lokalne zmiany geotermalne, sejsmiczne lub antropogeniczne?
- Czy klatraty metanu mogą pełnić rolę rezerwuaru gazowego, rejestrującego przebieg dawnych cykli geotermalnych, migracji wody i aktywności biologicznej? Czy ich obecność może być traktowana jako wskaźnik głębokiej historii systemu – analogicznie do izotopów, minerałów czy organizmów reliktowych?
- Czy lokalne anomalie magnetyczne mogą inicjować krystalizację wody w warunkach przechłodzenia i sprzyjać powstawaniu zmarzliny?
- Czy gwałtowne rozprężenie cieczy nasyconych gazami może być traktowane jako główny mechanizm chłodzenia niezależny od klimatu?
- Czy biegunowe czapy lodowe mogą być produktem synergii solanek, gazów pod ciśnieniem i magnetyzmu, a nie tylko klimatycznego mrozu?
- Jakie gatunki (np. *Methylococcus capsulatus*, *Methylosinus trichosporium*) mogą pełnić rolę biologicznych markerów głębokiego zasilania i izolacji?
- Czy lokalne anomalie termiczne w rejonie Suwałk można wytłumaczyć procesami gazowohydrologicznymi i magnetycznymi, a nie tylko warunkami klimatycznymi?

Pytania przykładowe obejmują również dotąd przemilczane aspekty – rolę magnetyzmu i minerałów żelaza w krystalizacji wody, mechanizm rozprężeniowego chłodzenia cieczy nasyconych gazami, udział organizmów metanotroficznych jako biologicznych wskaźników oraz możliwość reinterpretacji fenomenu Suwałk jako *‘bieguna zimna’* Polski. Włączenie tych zagadnień poszerza pole badawcze i wskazuje, że geneza zmarzliny oraz czap lodowych może być wynikiem synergii procesów gazowo-hydrologicznych, geochemicznych [21, 22, 26] i magnetycznych [8, 9, 12].

13. Wnioski końcowe i redefinicja zmarzliny

Model przedstawiony w pracy redefiniuje genezę zmarzliny i otwiera nowe perspektywy dla interdyscyplinarnego opisu procesów głębokiego górotworu. Woda, gaz i skała funkcjonują tu jako współzależne elementy dynamicznego układu. Integracja mechanizmów rozprężeniowych, niskotemperaturowych solanek i metanu pozwala ujmować zmarzlinę jako układ gazowo-hydrologiczny, którego geneza nie musi być związana z epoką lodowcową. Zamiast traktować ją jako relikտ paleoklimatyczny, należy rozważyć jej powstanie w wyniku procesów fizykochemicznych zachodzących pod zmiennym ciśnieniem i temperaturą.

Porównanie klasycznych źródeł gazowych z systemami opartymi na klatratach metanu (Tabela 3) ukazuje różnice w mechanizmach uwalniania gazu, stabilności wypływu i obecności mikroorganizmów. Wskazuje to, że zmarzlina może być efektem równowagi gazowo-hydrologicznej inicjowanej przez rozprężenie gazów w strukturach skalnych.

Tabela 3. Klasyczne źródła gazowe vs. źródła z klatratami metanu, Źródło: opracowanie własne
Table 3. Classical gas sources vs. methane clathrate-based sources, Source: authors' own study

Element	Klasyczne źródła gazowe	Źródła z klatratami metanu
Rodzaj gazu dominującego	CO ₂ , H ₂ S, CH ₄ (rozpuszczony)	CH ₄ uwięziony w strukturze lodowej, powstałej wskutek rozprężenia gazu
Mechanizm uwalniania gazu	Degazacja z głębi lub z roztworu gazowego	Rozprężenie metanu przy wyjściu z kapilar, prowadzące do formowania klatratów
Warunki fizykochemiczne	Niskie ciśnienie, umiarkowana temperatura	Zmienność ciśnienia i temperatury; lokalne zamarzanie
Stabilność wypływu	Zmienna, zależna od sezonowości	Stabilna; kontrolowana przez równowagę gaz-klatrat
Obecność mikroorganizmów	Bakterie siarkowe, denitryfikacyjne	Metanotrofy, organizmy reliktowe
Zjawiska towarzyszące	Degazacja, zmętnienie wody, obecność siarkowodoru	Ciche wypływy, struktury lodowe, lokalne zamarzanie
Zależność od warunków atmosferycznych	Wysoka – wpływ opadów i temperatury	Niska – system głęboki, izolowany termicznie
Znaczenie geochemiczne	Wskazuje na aktywność gazową i mineralizację	Długotrwała izolacja, zachowanie parametrów pierwotnych
Potencjał badawczy	Dobrze udokumentowany, klasyfikowany w literaturze	Słabo rozpoznany; otwarty na redefinicję

Dodatkowo, obecność magnetytu (Fe₃O₄) jako bufora redoks i źródła lokalnych anomalii magnetycznych sprzyja krystalizacji wody w warunkach przechłodzenia [8, 9, 12]. Mechanizm rozprężeniowego chłodzenia („efekt dezodorantu”) prowadzi do lokalnego zamarzania i uwięzienia gazów w strukturze lodowej. Zatem model ten może tłumaczyć nie tylko genezę zmarzliny suwalskiej, lecz także powstawanie biegunowych czap lodowych oraz epizody zlodowaceń w historii Ziemi jako rezultat synergii procesów gazowo-hydrologicznych, magnetycznych i geochemicznych.

Model gazowo-hydrologiczny pozwala również na reinterpretację fenomenu Suwałk jako polarnych obszarów Polski, tradycyjnie określanych mianem „bieguna zimna”. Zamiast wyłącznie klimatycznego uwarunkowania, proponowane ujęcie wskazuje na udział procesów endogenicznych – rozprężeniowego chłó-

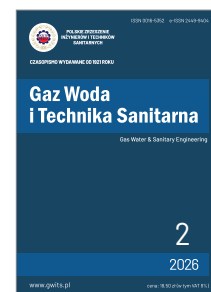
dzenia solanek, uwięzienia gazów w strukturach lodowych oraz oddziaływania lokalnych anomalii magnetycznych – w kształtowaniu stabilnych stref niskiej temperatury. W tym kontekście Suwałki mogą być traktowane jako przykład regionu, w którym głębokie procesy gazowo-hydrologiczne współtworzą obraz klimatyczny i geologiczny, czego dowodem jest zmarzlina suwalska stwierdzona na głębokości 350–400 m p.p.t.

14. Podziękowania

Pracę tę dedykuję mojej Mamie – Geologowi, której pasja i wrażliwość na piękno procesów Ziemi były dla mnie nieustającym źródłem inspiracji.

15. Bibliografia

- [1] Paleczek, W. (2023). Uderzenie hydrodynamiczne w próbie oceny możliwości analizy przyczyn uszkodzeń nawierzchni z betonu asfaltowego. *Przegląd Komunikacyjny*, 78(11/12), 15-22.
- [2] Paleczek, W. (2025). Model geotermalno-krasowy zasilania wód słodkich: propozycja alternatywna wobec klasycznego cyklu hydrologicznego. *Gaz Woda i Technika Sanitarna*, 99(11), 34-37. <https://doi.org/10.15199/17.2025.11.4>.
- [3] Aeschbach-Hertig, W., & Solomon, D. K. (2013). Noble gas thermometry in groundwater hydrology. *The noble gases as geochemical tracers*, 81-122.
- [4] Appelo, C. A. J., & Postma, D. (2004). *Geochemistry, groundwater and pollution*. CRC press.
- [5] Chemistry Stack Exchange. (2025). Why does calcium chloride cause a greater freezing point depression in water than magnesium chloride? Dostęp online: <https://chemistry.stackexchange.com/questions/58816/why-does-calcium-chloride-cause-a-greater-freezing-point-depression-in-water-tha> (dostęp: 19 października 2025).
- [6] He, R., Hu, B., Zhong, H., Jin, F., Fan, J., Hu, Y. H., & Jing, Z. (2019). Reduction of CO₂ with H₂S in a simulated deep-sea hydrothermal Vent System. *Chemical Communications* 55, no. 8: 1175–1178. <https://doi.org/10.1039/C8CC08075E>.
- [7] Navarro-Cárdenas, I., & Martín, Á. (2023) Thermodynamic modelling of mixtures of water, carbon dioxide and hydrogen at high pressure and temperature for hydrothermal CO₂ reduction processes. *Frontiers in Physics* 11: 1219630. <https://doi.org/10.3389/fphy.2023.1219630>.
- [8] Otero, L., Rodríguez, A. C., & Sanz, P. D. (2020). Effect of the frequency of weak oscillating magnetic fields on supercooling and freezing kinetics of pure water and 0.9% NaCl solutions. *Journal of Food Engineering*, 273, 109822.
- [9] Jarulertwattana, P., Siri wattanayotin, S., & Asavasanti, S. (2020). Effect of oscillating magnetic field on freezing rate, phase transition time and supercooling of deionized water. *Applied Science and Engineering Progress*, 13(1), 32-37. <http://doi.org/10.14416/j.asep.2019.08.001>
- [10] Honczaruk, M., & Śliwiński, Ł. (2011). Wyniki badań hydrogeologicznych w strefie występowania głębokiej wieloletniej zmarzliny w otworze wiertniczym Udryń Pig 1. *Biuletyn Państwowego Instytutu Geologicznego*, 445(445-1), 203-216. <http://doi.org/10.2478/v10134-011-0015-3>
- [11] Upin, H. (2020). *Connections Between Hydrothermal System Geochemistry and Microbiology: Traversing Tectonic Boundaries in the South-Central Peruvian Andes* (Master's thesis, Utah State University).
- [12] Urbic, T. (2023). The Magnetic Field Freezes the Mercedes-Benz Water Model. *Entropy*, 25(12), 1618. <http://doi.org/10.3390/e25121618>
- [13] Państwowy Instytut Geologiczny – Państwowy Instytut Badawczy. (2025). Odkryto wieczną zmarzlinę w Polsce. Dostęp online: <https://www.pgi.gov.pl/kontakt/rzecznik-prasowy/2723-odkryto-wieczna-zmarzlin-polsce.html>
- [14] Carroll, J. (2020). *Natural gas hydrates: a guide for engineers*. Gulf Professional Publishing.
- [15] Sander, R. (2015). Compilation of Henry's law constants (version 4.0) for water as solvent. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 15(8), 4399-4981. <https://doi.org/10.5194/acp-15-4399-2015>.
- [16] Kvenvolden, K. A. (1988). Methane hydrate—a major reservoir of carbon in the shallow geosphere?. *Chemical geology*, 71(1-3), 41-51. [http://doi.org/10.1016/0009-2541\(88\)90104-0](http://doi.org/10.1016/0009-2541(88)90104-0)
- [17] Rouwet, D., Tamburello, G., Sciarra, A., Ricci, T., & Caliro, S. (2018, April). The Fangaia mud pool, Solfatara (Campi Flegrei, Italy): the effect of scrubbing on CO₂ and H₂S degassing. In *EGU General Assembly Conference Abstracts* (p. 14058). <https://doi.org/10.3390/min10121051>.
- [18] Li, S., Dong, X., Humez, P., Borecki, J., Birks, J., McClain, C., Mayer, B., Strous M., & Diao, M. (2025). Proteomic evidence for aerobic methane production in groundwater by methylotrophic Methylothermus. *The ISME Journal*, 19(1), wraf024. <https://doi.org/10.1093/ismejo/wraf024>.
- [19] Buffett, B., & Archer, D. (2004). Global inventory of methane clathrate: sensitivity to changes in the deep ocean. *Earth and Planetary Science Letters*, 227(3-4), 185-199. <http://doi.org/10.1016/j.epsl.2004.09.005>
- [20] Longone, P. J., Sanchez Varretti, F. O., Bulnes, F. M., & Ramirez Pastor, A. J. (2024). Lattice-gas model of methane and carbon dioxide sl clathrate hydrates: A comprehensive study using analytical cluster approximation and Monte Carlo simulations. *Physical Review E*, 110(6), 064103. <https://doi.org/10.1103/PhysRevE.110.064103>.
- [21] Sloan Jr, E. D., & Koh, C. A. (2007). *Clathrate hydrates of natural gases*. CRC press.
- [22] Max, M. D., Johnson, A. H., & Dillon, W. P. (2009). Economic geology of methane hydrate: Potential and challenges. W: T. S. Collett, A. Johnson, C. Knapp & R. Boswell (red.), *Natural gas hydrates—Energy resource potential and associated geologic hazards* (AAPG Memoir 89, s. 313–352). American Association of Petroleum Geologists; Max, M. D., Johnson, A. H., & Dillon, W. P. (2006). *Economic Geology of Natural Gas Hydrate*. Springer.
- [23] Bregnard, D., Leins, A., Cailleau, G., Vieth-Hillebrand, A., Eichinger, F., Ianotta, J., Hoffmann, R., Uhde, J., Bindschedler S., Regensourg, S., & Junier, P. (2023). Unveiling microbial diversity in deep geothermal fluids, from current knowledge and analogous environments. *Geothermal Energy*, 11(1), 28. <https://doi.org/10.1186/s40517-023-00269-z>.
- [24] Urbiet, M. S., Panyushkina, A., Cuadros-Orellana, S., Gonzalez-Toril, E., Aguilera-Bazán, A., & Blamey, J. M. (2023). Microbial communities from geothermal fields: recent advances on characterization, interaction with the environment, and potential applications in biotechnology. *Frontiers in Microbiology*, 14, 1205759. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2023.1205759>.
- [25] Juan, J., Pronsato, M. E., Ramirez-Pastor, A. J., & Longone, P. (2025). Two-Dimensional Lattice-Gas model for methane clathrate Hydrates: Comparative analysis with experiments and Three-Dimensional simulations. *Journal of Molecular Liquids*, 127669. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2025.127669>.
- [26] Ruppel, C. D., & Kessler, J. D. (2017). The interaction of climate change and methane hydrates. *Reviews of Geophysics*, 55(1), 126-168. <https://doi.org/10.1002/2016RG000534>.



SimNet SSWater – program do symulacji statycznej sieci wodociągowych SimNet SSWater – a program for steady state simulation water supply networks

Andrzej J. Osiadacz^{1,2*} , Łukasz Kotyński^{1,2} , Maciej Chaczykowski¹

¹ Wydział Inżynierii Środowiska, Politechnika Warszawska

² Fluid Systems Sp. z o.o.

* Kontakt / Correspondence: andrzej.osiadacz@pw.edu.pl

Streszczenie:

W artykule omówiono pakiet SimNet SSWater służący do symulacji statycznej sieci wodociągowych w którym technologia GIS jest wykorzystywana do przechowywania i zobrazowania graficznych i alfanumerycznych informacji o obiektach sieci. Opisano strukturę pakietu oraz właściwości obliczeniowe. Załączony przykład świadczy o poprawności jego działania.

Słowa kluczowe: symulacja komputerowa, sieci wodociągowe, stan ustalony, technologia GIS

Abstract:

The article discusses the SimNet SSWater package used to simulate steady state water supply networks, in which GIS technology is used to store and display graphical and alphanumeric information about network objects. The structure of the package and its computational properties are described. The attached example proves that it works correctly.

Keywords: computer simulation, water networks, steady state, GIS technology

1. Wstęp

Symulacja komputerowa sieci wodociągowych umożliwia badanie zachowania się sieci w różnych warunkach dostawy i zużycia wody. Rezultatem badań symulacyjnych są m.in. wartości przepływu, prędkości strumienia wody, ciśnienia w wybranych punktach sieci co pozwala ocenić jakość eksploatacji sieci. Analiza jakości eksploatacji sieci z wykorzystaniem programów symulacyjnych dostarcza informacji, na podstawie których można podejmować decyzje dotyczące nie tylko zmiany wybranych parametrów eksploatacji, ale także jest bardzo pomocnym narzędziem w fazie budowy lub rozbudowy sieci.

2. Symulacja sieci

Pakiet SimNet SSWater jest aplikacją obliczeniową z przyjaznym interfejsem użytkownika pracującą w systemie MS Windows. Wykorzystuje się w nim technologię GIS do przechowywania i zobrazowania graficznych (geograficznych) i alfanumerycznych informacji o obiektach sieci wodociągowej, potrzebnych do wykonania obliczeń symulacyjnych tej sieci. Informacje geograficzne (dotyczące topologii sieci) i informacje alfanumeryczne (opisowe) elementów sieci przechowywane są w standardowych wektorowych plikach graficznych oraz plikach relacyjnej bazy danych, odpowiednio formatu

*.shp oraz *.dbf. Moduł obliczeniowy pozwala na wykonywanie obliczeń symulacyjnych sieci wodociągowych o dowolnej strukturze i dowolnym poziomie ciśnienia. W obliczanej sieci może występować dowolna liczba źródeł o różnych wartościach ciśnienia lub wydajności oraz dowolna liczba innych elementów nierurowych (zawory, reduktory, źródła, pompy, zbiorniki). Warto podkreślić funkcjonalnością oprogramowania jest sposób zapisu elementów nierurowych, reprezentowanych za pomocą dwóch węzłów: wejściowego i wyjściowego oraz jednego z pięciu parametrów: ciśnienie wejściowe, ciśnienie wyjściowe, stosunek ciśnienia na wyjściu do ciśnienia na wejściu (stopień redukcji / spiętrzenia), natężenie przepływu, przyrost / spadek ciśnienia. Proponowany opis matematyczny elementu nierurowego pozwala w elastyczny sposób określać jego nastawy i umożliwia łatwą modyfikację oprogramowania na potrzeby wprowadzania charakterystyk pomp, reduktorów, zaworów, zbiorników itp. Przyjmuje się, że struktura sieci składa się z następujących elementów: węzły, odcinki, źródła, pompy/pompownie, zbiorniki, reduktory, zawory, przyłącza.

Dodatkowym wymaganie jest posiadanie informacji na temat obciążenia sieci, parametrów zasilania sieci oraz poziomu wody w zbiornikach. Specyfikacja standardowej analizy sieci w stanie ustalonym została przedstawiona poniżej.

Tabela 1. Specyfikacja standardowej analizy sieci
Table 1. Standard network analysis specification

Elementy projektu	Wymagane dane	Rezultaty
Sieć Rura	Topologia sieci Długość, średnica, chropowatość	Przepływ, prędkość przepływu, ciśnienie w węzłach
Zbiornik	Poziom wody	Ciśnienie
Węzły	Obciążenie	Ciśnienie
Pompy	Charakterystyka pompy	Ciśnienie, przepływ
Zawory regulacyjne	Kierunek przepływu, wartość zadana	Przepływ, ciśnienie

- Rezultaty symulacji spełniają poniższe warunki:
- a) Algebraiczna suma wszystkich przepływów (w tym zapotrzebowania konsumentów) wpływających do węzła lub z niego wypływających wynosi zero.
 - b) Algebraiczna suma wszystkich spadków ciśnienia w dowolnym oczku sieci wynosi zero.
 - c) Strata ciśnienia w rurach i pompach jest funkcją przepływu. Ciśnienie na wejściu, ciśnienie na wyjściu oraz przepływ przez zawór regulacyjny są zgodne z równaniem regulacji zaworu.

Nieliniowy charakter równania przepływu powoduje, że symulacja polega na iteracyjnym rozwiązywaniu układu równań algebraicznych nieliniowych. Aplikacja SimNet SSWater wykorzystuje swój własny silnik obliczeniowy oparty na metodzie oczkowo-węzłowej. Dokładny opis metody oczkowo-węzłowej znajduje się w [1].

Prezentowany model przepływu opisuje zarówno straty tarcia jak i straty lokalne:

$$\Delta h_{i,j} = h_i - h_j = g_{i,j}(q_{i,j}) = R_{i,j}q_{i,j}|q_{i,j}|^{\alpha-1} \tag{1}$$

- gdzie:
- $q_{i,j}$ – przepływ w rurze łączącej węzły „i” i „j”,
 - $R_{i,j}$ – oporność hydrauliczna,
 - A – wykładnik empiryczny.

W literaturze można odnaleźć trzy podstawowe formuły definiujące parametry modelu:

- formuła Darcy-Weisbach’a,
- formuła Hazen-Williams’a,
- formuła Chezy-Manning’a.

Tabela 2. Parametry R_f oraz α
Table 2. Parameters R_f and α

Formuła	Współczynnik oporności hydraulicznej (R_f)	Wykładnik (α)
Hazen-Williams’a	$1,21216 \cdot 10^{10} C_{HW,i,j}^{-1,852} D_{i,j}^{-4,87} L_{i,j}$	1,852
Darcy-Weisbach’a	$8,27 \cdot 10^7 f(C_{DW,i,j}, D_{i,j}, q_{i,j}) D_{i,j}^{-5} L_{i,j}$	2
Chezy-Manning’a	$4,66 \cdot C_{MN,i,j}^2 D_{i,j}^{-5,33} L_{i,j}$	2

- gdzie:
- $C_{HW,i,j}$ – współczynnik Hazen-Williams’a,
 - $C_{DW,i,j}$ – współczynnik Darcy-Weisbach’a,
 - f – współczynnik tarcia (funkcja $C_{DW,i,j}, D_{i,j}, q_{i,j}$),
 - $C_{MN,i,j}$ – współczynnik Manning’a,
 - $D_{i,j}$ – średnica rury [mm],
 - $L_{i,j}$ – długość rury [m].

Formuła Hazen-Williams’a jest rozsądnym kompromisem między dokładnością modelu, a prostotą jego opisu. Jest ona najczęściej używaną formułą przy modelowaniu sieci dystrybucji wo-

dy. Jak wynika z tabeli rezystancja hydrauliczna jest określona zależnością:

$$R_{i,j} = \frac{1,21216 \cdot 10^{10} L_{i,j}}{C_{HW,i,j}^{1,852} D_{i,j}^{4,87}} \tag{2}$$

Po uwzględnieniu wartości wykładnika α model przyjmuje postać:

$$\Delta h_{i,j} = h_i - h_j = g_{i,j}(q_{i,j}) = R_{i,j}q_{i,j}|q_{i,j}|^{0,852} \tag{3}$$

Symulacja sieci dotyczy stanu ustalonego, a więc obliczeń parametrów sieci dla stałych wartości dostawy oraz odbioru wody. W przypadku, gdy dysponujemy prognozą zużycia w określonym przedziale czasowym np. 24 godzinnym, symulacja składa się z serii obliczeń sieci w stanie ustalonym dla kolejnych wartości odbioru wody.

W tych obliczeniach zbiorniki mogą być traktowane jako elementy o przedziałami stałym ciśnieniu (poziomie), pompy o przedziałami stałej prędkości a urządzenia sterujące o różnych wartościach zadanych w każdej serii obliczeń.

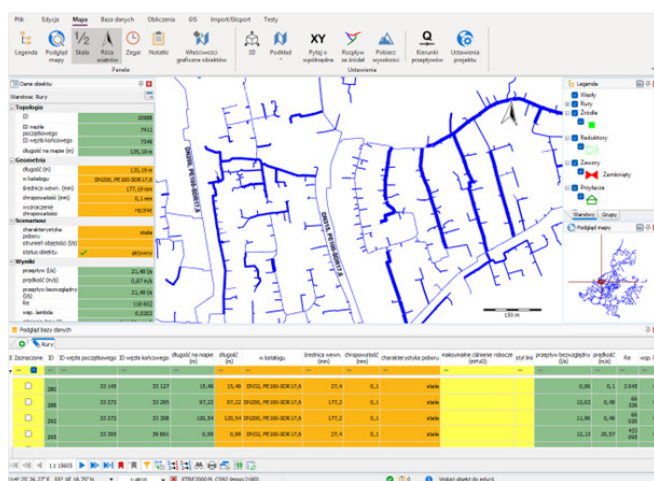
3. SimNet SSWater

Program symulacyjny SimNet SSWater zapewnia pełen zakres funkcji zarówno do symulacji sieci, jak i tradycyjnej analizy sieci w stanie ustalonym.

Zarchiwizowane wyniki obejmują pełne analizy sieci, zawierające wartości ciśnienia w węzłach sieci, przepływów w rurach, poziomów wody w zbiornikach, status elementów nierurowych itp. w każdej serii obliczeń. Istnieje możliwość zarówno prezentacji kompletu wyników dla wybranego przedziału czasu symulacji jak również zmiany wybranego parametru podczas symulacji w całym okresie badania sieci. Mechanizm tworzenia scenariuszy pracy sieci pozwala w prosty sposób dokonać analizy stanu sieci wodociągowej dla różnych wartości parametrów wejściowych a następnie otrzymane wyniki przedstawić graficznie w przyjaznej dla użytkownika formie.

Aplikacja SimNet posiada nowoczesny interfejs oparty na menu wstążki znane z aplikacji Microsoft Office. Pozwala to na łatwą obsługę programu i szybkie nauczanie się nawigacji po menu. Okno wprowadzania danych jest bardzo podobne do tego znanego z aplikacji EPANET [2] jednak jest dużo bardziej rozbudowane. Poszczególne grupy parametrów są rozróżnione za pomocą kolorów oraz kategorii. Pola do wprowadzania w zależności od typu informacji posiadają wbudowane kalkulatory, listy rozwijane, symbole graficzne, kalendarze i rozbudowane pola tekstowe. Wprowadzanie danych o sieci może zostać znacznie uproszczone przez mechanizmy importu danych z plików i zewnętrznych baz danych. W celu przyspieszenia wprowadzania informacji można skorzystać z wbudowanych katalogów rur, składów płynu, charakterystyk poboru czy chropowatości rur. Samo wprowadzanie sieci jest oparte na środowisku GIS co pozwala na dokładne odzwierciedlenie trasy przebiegu sieci wzdłuż rzeczywistych rurociągów. Wykorzystanie GIS-u posiada również wiele innych zalet. Sieć może zostać wprowadzona ręcznie oraz wczytana automatycznie z gotowych warstw wektorowych. W skład rozpoznawanych formatów plików wchodzi prawie 30 formatów plików wektorowych oraz prawie 20 formatów plików rastrowych, które mogą być wykorzystywane jako podkład. Użytkownik może podłączyć nieograniczoną liczbę dodatkowych warstw do projektu sieci takich jak podkłady geodezyjne,

sieci branżowe, mapy pogodowe, uzbrojenie terenu czy zdjęcia satelitarne. Wykorzystanie GIS-u daje również możliwość podłączenia map internetowych z serwisów WMS, WMTS, WFS czy WCS. Podłączane warstwy mogą być zapisane w dowolnych układach współrzędnych a pomimo to zostaną poprawnie odwzorzone w przestrzeni i nałożone na siebie w odpowiednich miejscach. Możliwości te są gotowe do wykorzystania w aplikacji i nie wymagają dodatkowych rozszerzeń jak w przypadku aplikacji EPANET. Wbudowane narzędzia do podglądu wyników dają dużo więcej możliwości niż w darmowych aplikacjach symulacyjnych. Do wyboru jest podgląd bazy danych z zaawansowanymi możliwościami sortowania, filtrowania, edycji, eksportu czy raportowania. Wszystkie informacje można również wyświetlić za pomocą różnej kolorystyki, rozmiaru czy kształtu obiektów. Etykiety wyświetlane na mapie mogą być dowolnie rozbudowywane o dane wejściowe, wyniki symulacji oraz informacje użytkownika. Podobnie jak EPANET wyniki symulacji można również zobrazować za pomocą wykresów, które w aplikacji SimNet są jednak dużo bardziej rozbudowane i umożliwiają na dowolne zaprezentowanie potrzebnych informacji. Dodatkowo przygotowane wykresy mogą zostać wydrukowane lub zapisane do pliku graficznego. Aplikacja SimNet umożliwia również przygotowanie szablonów wydruku, które po personalizacji przez użytkownika pozwalają szybko i sprawnie tworzyć profesjonalnie wyglądające mapy cyfrowe.



Rys. 1. Główne okno aplikacji

Fig. 1. Main application window

4. Elementy sieci

Warunkiem koniecznym efektywnego formułowania układu równań algebraicznych nieliniowych będących głównym elementem algorytmu symulacji sieci jest odpowiedni zapis struktury (topologii sieci). Musi to być zapis prosty, jednoznaczny i łatwy do modyfikacji. Te kryteria spełnia teoria grafów. Struktura sieci zapisana w postaci grafu (jej reprezentacji macierzowej) zawiera pełną informację o incydencji poszczególnych elementów sieci.

Węzłem grafu-sieci jest punkt, w którym jest spełniony jeden z poniższych warunków:

- spotyka się trzy lub więcej rur,
- spotykają się dwie rury o różnych średnicach,
- rura zmienia swój kierunek,

- znajduje się punkt odbioru wody.

Łukiem grafu skierowanego odwzorowującego topologię sieci jest odcinek rurociągu opisany przez węzeł początkowy, węzeł końcowy, średnicę, długość oraz chropowatość bezwzględną.

Elementy nierurowe występujące w sieci takie jak:

- źródło – węzeł zasilający,
- reduktor,
- zawór,
- pompa/przepompownia,
- zbiornik,

opisane są przez uporządkowaną parę węzłów (v_x, v_y) gdzie: v_x – oznacza węzeł początkowy, a v_y – oznacza węzeł końcowy.

Każdy element sieci jest przedstawiony graficznie. Symbole graficzne podano na rysunku 2. Użytkownik może w dowolny sposób dostosować wygląd symboli poszczególnych elementów do swoich wymagań.



Rys. 2. Symbole graficzne elementów sieci

Fig. 2. Graphic symbols for network elements

Zaznaczone	ID węzła początkowego	ID węzła końcowego	długość na mapie (m)	długość w katalogu (m)	chropowatość (mm)	charakterystyka poboru	maksymalne ciśnienie robocze (MPa)	styl lin
	27,39 (I)							
	średnica wewn. : 27,4 (I)							
	średnica wewn. : 27,89 (I)							
	średnica wewn. : 27,9 (I)							
	średnica wewn. : 32,2 (I)							
	średnica wewn. : 32,6 (I)							
	21	39 189	39 186	20,83	20,83	PE100-SDR 11	0,1	stała
	19	35 044	35 067	7,95	7,95	PE100-SDR 11	0,1	stała
	32							
	13							
	średnica wewn. : 35,4 (I)							
	średnica wewn. : 35,4 (I)							
	średnica wewn. : 41,09 (I)							
	średnica wewn. : 41,1 (I)							
	średnica wewn. : 44,2 (I)							
	20	33 775	33 729	35,34	35,34	DN50 PE100-SDR 17,6	0,1	stała
	54							

Rys. 3. Podgląd bazy danych dla rur agregowanych według średnicy wewnętrznej

Fig. 3. Database preview for pipes aggregated by internal diameter

4.1. Źródła o stałym ciśnieniu

W źródłach i dużych zbiornikach (w których wahania poziomu wody można pominąć) przyjmuje się stałą wartość ciśnienia w węzłach wyjściowych.

4.2. Zbiorniki o zmiennym ciśnieniu

W przypadku zbiorników, w których poziom wody może ulegać zmianie podczas wielokrotnej symulacji, przyjmuje się przedziałami stałą wartość ciśnienia w węźle wyjściowym. Obliczaną na podstawie charakterystyki zbiornika.

4.3. Rury

Zakłada się, że jest to prosty odcinek rurociągu o stałej średnicy i chropowatości.

Wymagane parametry:

- węzeł początkowy,
- węzeł końcowy,
- średnica,
- długość,
- wartość współczynnika tarcia.

Wartość współczynnika tarcia to wartość C według wzoru Hazena-Williamsa lub wartość chropowatości k (mm) według wzoru Colebrook-White'a, w zależności od tego, który wzór jest wykorzystywany. Tabele wartości C i k można znaleźć odpowiednio w [3] oraz [4].

4.4. Pompy

Zarówno pompy źródłowe (węzeł wyjściowy o stałym ciśnieniu), jak i pompy wspomagające mogą być modelowane jako elementy o stałej lub zmiennej prędkości przepływu. Wymagane parametry:

- węzeł początkowy,
- węzeł końcowy,
- prędkość nominalna (tylko w przypadku pomp o zmiennej prędkości),
- charakterystyka pompy (krzywa podnoszenia/przepływu).

Pompy o zmiennej prędkości można modelować bezpośrednio, jeśli określono prędkość nominalną, jeśli dane operacyjne zawierają zaplanowane zmiany prędkości i jeśli krzywa podnoszenia/przepływu ma postać kwadratową:

$$H = A Q^2 \left(\frac{n}{n_0} \right)^2 + B Q \left(\frac{n}{n_0} \right) + C \quad (4)$$

gdzie:

- H – wysokość podnoszenia,
- Q – przepływ,
- n – rzeczywista prędkość,
- A, B i C – stałe pompy.

4.5. Zawory regulacyjne

Zawory regulacyjne, opisywane są za pomocą jednego z wymienionych parametrów:

- ciśnienie w węźle wejściowym,
- ciśnienie w węźle wyjściowym,
- przepływ przez zawór,
- spadek ciśnienia na zaworze.

Pozostałe wartości parametrów obliczane są w trakcie procesu symulacji sieci.

Spadek ciśnienia na zaworze obliczany jest z zależności:

$$\Delta P = Q^2 K_v^{-2} \quad (5)$$

gdzie:

- ΔP – spadek ciśnienia,
 - K_v – współczynnik dławienia,
 - Q – przepływ.
- lub

$$\Delta P = 132,15 (Q^2 K_v^{-2}) \quad (6)$$

gdzie:

- ΔP – spadek ciśnienia w metrach słupa wody,
- Q – przepływ.

5. Rezultaty symulacji

Program realizuje cztery podstawowe funkcje dotyczące obliczeń hydraulicznych:

- wprowadzanie i sprawdzanie poprawności danych,
- sprawdzanie spójności grafu sieci,
- symulacja sieci,
- analiza wyników.

Poza obliczeniami, program może być również wykorzystywany jako baza danych majątku sieciowego z dokładną lokalizacją poszczególnych obiektów. Symulacja sieci jest zasadniczo serią analiz chwilowych w różnych momentach okresu symulacji. Pojedyncza analiza oblicza ciśnienia w węzłach, przepływy w rurach, stan pomp i zaworów, poziomy zbiorników oraz inne informacje, np. prędkość, straty ciśnienia itp. Obliczenia są procesem iteracyjnym i trwają do momentu spełnienia warunku zakończenia obliczeń.

5.1. Interfejs graficzny

Moduł geograficzny wykorzystuje mapowe, obiektowe oprogramowanie GIS, charakteryzujące się następującymi cechami:

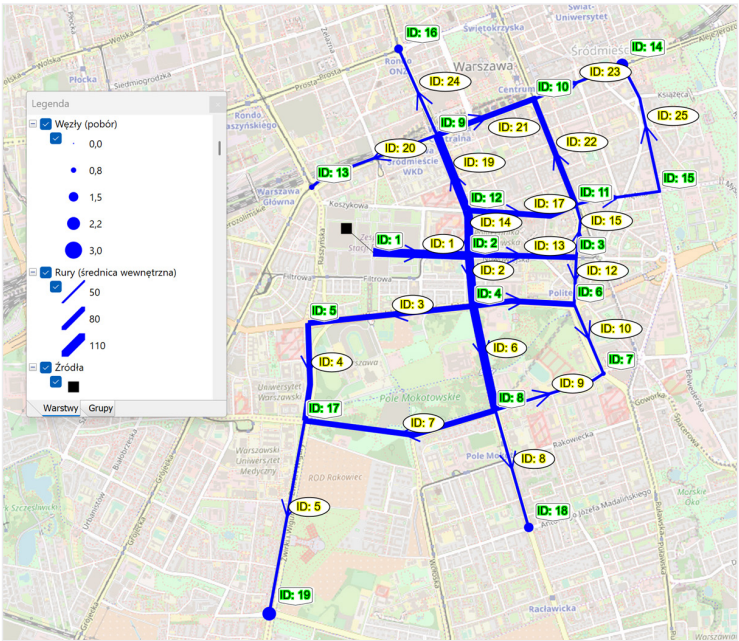
- możliwość jednoczesnego otwarcia nieograniczonej liczby warstw (związanych nie tylko z symulacją),
- gradientowanie kolorem i rozmiarem etykiet i obiektów, zmiany wyglądu (kolor, styl, wypełnienie, obramowanie, symbol, przezroczystość, itp.), w oparciu o wartości parametrów będących danymi do obliczeń sieci lub wyniki symulacji,
- wyświetlanie dowolnych warstw użytkownika:
 - pliki wektorowe m.in.: SHP, TAB, MID/MIF, DXF, DGN, oraz warstwy z baz danych SQL,
 - pliki graficzne m.in.: GeoTIFF, World File, TAB, GIF, TIF, JPEG, PNG, BMP,
- import, eksport warstw GIS w tym migracja projektów z aplikacji EPANET, która umożliwia szybkie przeniesienie danych do nowego programu,
- import danych alfanumerycznych z zewnętrznych baz danych lub arkuszy kalkulacyjnych.

Podczas tworzenia nowego projektu znaczna część danych, jeśli nie będzie mogła zostać automatycznie zaimportowana przez wbudowane mechanizmy, może zostać wprowadzona ręcznie z pomocą przygotowanych katalogów danych. Wybierając gotowe zestawy danych z katalogów rur czy innych można znacznie przyspieszyć etap tworzenia lub modyfikacji projektu. Użytkownik może samodzielnie modyfikować pozycje w katalogach, dzięki czemu raz wprowadzone dane mogą być wykorzystane dla kolejnych projektów.

Poniżej zaprezentowano zrzut wyników symulacji przykładowo-

wej sieci, który przedstawia wykorzystanie renderów do zobrażenia średnic wewnętrznych rur za pomocą grubości linii oraz wartości poboru wody za pomocą różnej wielkości symboli węzłów. Dodatkowo widoczne są opisy rur i węzłów przedstawia-

jące identyfikatory poszczególnych obiektów. Opisy mogą być dowolnie modyfikowana i prezentować dowolne dane wejściowe czy wyniki symulacji.



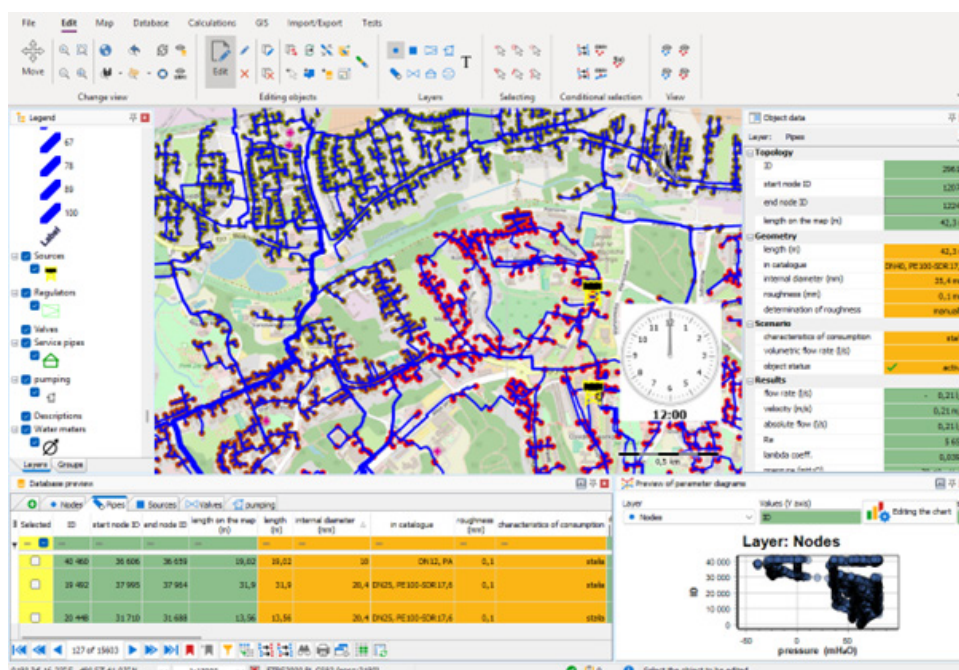
Rys. 4. Wyniki symulacji statycznej
Fig. 4. Results of steady state simulation

Tabela 3. Parametry węzłów
Table 3. Node parameters

ID	Wysokość [m]	Ciśnienie [mH ₂ O]	Strumień objętości [l/s]
1	115,	50,	0
2	114,4	43,83	0
3	113,	44,74	0
4	106,7	50,65	0
5	114,2	41,91	0
6	114,9	42,45	0
7	110,7	45,77	0,6
8	111,6	44,88	0
9	114,5	42,47	0
10	113,6	43,22	0
11	113,3	43,82	0
12	114,5	43,1	0
13	114,2	39,53	0,8
14	109,3	42,75	2
15	110,6	44,52	0,
16	114,4	36,33	1,4
17	112,1	43,28	0
18	109,9	36,25	1,6
19	110,3	9,52	2,4

Tabela 4. Parametry rur
Table 4. Pipe parameters

ID	ID węzła początkowego	ID węzła końcowego	długość [m]	średnica wewn. [mm]	przepływ [l/s]
1	1	2	662,95	107,1	8,8
2	2	4	348,63	107,1	4,15
3	4	5	1 144,29	82,5	1,3
4	5	17	674,69	82,5	1,3
5	17	19	1 352,43	54,5	2,4
6	4	8	735,47	107,1	2,76
7	8	17	1 344,71	82,5	1,1
8	8	18	839,66	54,5	1,6
9	8	7	789,55	54,5	0,06
10	7	6	517,37	54,5	– 0,54
11	6	4	697,72	82,5	– 0,1
12	6	3	323,49	54,5	– 0,45
13	3	2	739,59	82,5	– 0,99
14	2	12	314,15	107,1	3,66
15	11	3	369,17	54,5	– 0,54
17	11	12	767,03	82,5	– 0,96
18	11	15	592,57	54,5	0,79
19	12	9	558,36	107,1	2,7
20	9	13	940,91	54,5	0,8
21	9	10	725,25	82,5	0,5
22	10	11	783,68	82,5	– 0,71
23	10	14	652,86	54,5	1,21
24	9	16	649,67	54,5	1,4
25	14	15	912,14	54,5	– 0,79



Rys. 5. Wizualizacja poziomów ciśnienia w węzłach sieci
Fig. 5. Visualization of pressure levels in network nodes

6. Zalety stosowania programu do symulacji sieci wodociągowej

- rozpoznanie warunków pracy poszczególnych odcinków sieci, np. wyznaczanie fragmentów, w których sieć jest przeciążona (wąskich gardeł) i tych, w których istnieją rezerwy przepustowości,
- planowanie bieżących prac eksploatacyjnych i naprawczych, wymagających czasowych zmian organizacji rozplywu w systemie - sprawdzanie jakości funkcjonowania sieci podczas remontów,
- określanie niezbędnej liczby urządzeń pomiarowych oraz ich lokalizacji (pomiaru w innych punktach systemu mogą być zastąpione wynikami obliczeń symulacyjnych),
- ocena jakości pracy systemu telemetrycznego i urządzeń pomiarowych w oparciu o porównanie wyników symulacji z wynikami pomiarów przeprowadzonych w wybranych punktach sieci (po wcześniejszej kalibracji modelu na podstawie sprawdzonych danych pomiarowych),
- eliminacja w fazie projektowania błędnych wariantów rozbudowy i modernizacji sieci,
- zwiększenie niezawodności zaopatrzenia w wodę przez wyznaczenie dróg awaryjnego zasilania poszczególnych rejonów miasta,
- poprawa parametrów pracy sieci (obniżenie ciśnień roboczych),
- ograniczenie strat wody, zarówno poprzez monitorowanie stanu pracy sieci jak i dzięki niższym ciśnieniom roboczym w miejscach niewielkich nieszczelności.

- podniesienie kwalifikacji pracowników służb dyspozytorskich, poprzez możliwość zobrazowania konsekwencji każdej ich ingerencji w pracę systemu,
- graficzna prezentacja wyników symulacji oraz informacji o elementach sieci,
- łatwe i szybkie wyszukiwanie obiektów na podstawie konkretnych parametrów wykorzystując technologię GIS,
- proste i szybkie tworzenie raportów i zestawień dotyczących wyników symulacji,
- zobrazowanie potrzebnych informacji za pomocą różnych rozwiązań (tabele, wykresy, opisy, symbole, kolory, wielkości),
- możliwość poszerzenia funkcjonalności aplikacji do potrzeb użytkownika.

7. Bibliografia

- [1] Osiadacz, A. J. (1988). Method of steady-state simulation of a gas network. *International Journal of Systems Science*, 19(11), 2395–2405. <https://doi.org/10.1080/00207728808964126>
- [2] Dawidowicz, J., Walery, M., Kruszyński, W., & Gvishiani, Z. (2021). *Modelowanie systemów dystrybucji wody za pomocą programu EPANET 2.2*. Białystok.
- [3] Institution of Water Engineers and Scientists. (1984). *Water practice manual No. 4 – Water distribution systems* (B. T. W. Brandon, red.).
- [4] Miller, D. S. (1971). *Internal flow: A guide to losses in pipe and duct systems*. British Hydromechanics Research Association.

Czy LNG powstało w Polsce?

LNG was invented in Poland?

Grzegorz Rostonek^{1*}

¹ Orlen S.A., ul. Kasprzaka 25, 01-224 Warszawa, Polska

* Kontakt / Correspondence: grzegorz.roszonek@pgnig.pl

Streszczenie:

W artykule przedstawiono historię myśli inżynierskiej w Polsce dotyczącej skraplania podstawowych gazów oraz skraplania gazu ziemnego. Zaprezentowano wybitnych polskich naukowców i inżynierów, którzy wnieśli wkład w uzyskiwanie gazów ziemnych i dali podstawy do światowej kriogeniki. Postawiono tezę, że skroplony gaz ziemny LNG mógł być po raz pierwszy uzyskany na początku XX w. na terenach polskich. Przedstawiono zarys rozwoju LNG po II Wojnie Światowej na świecie i w Polsce.

Słowa kluczowe: gazy skroplone, LNG, historia gazownictwa, pomiary LNG

Abstract:

This article presents the history of engineering thought in Poland concerning the liquefaction of basic gases and the liquefaction of natural gas. It presents outstanding Polish scientists and engineers who contributed to the production of natural gases and laid the foundations for global cryogenics. It proposes that liquefied natural gas (LNG) may have been first produced in Poland in the early 20th century. It also outlines the development of LNG after World War II, both globally and in Poland.

Keywords: liquefied gases, LNG, history of gas industry, LNG measurements

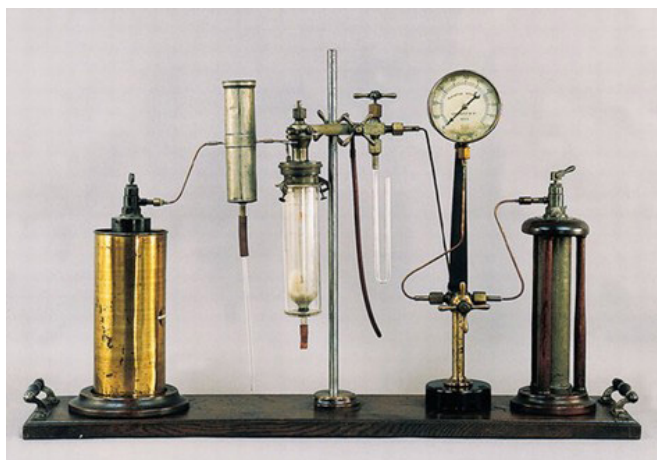
1. Zgrany Duet

Historia skroplonego gazu ziemnego LNG (ang.: Liquefied Natural Gas), choć już ponad stuletnia, to jednak nie jest tak długa jak historia gazów skroplonych w ogóle. Nie mogło być mowy o LNG jako takim, gdyby wcześniej nie opanowano technik dających możliwość dokonywania skropleń gazów. Samo LNG jest szczególnym gazem skroplonym, ponieważ jest paliwem i surowcem. Zanim jednak doszło do skroplenia mieszaniny gazu ziemnego to najpierw nauka musiała sobie poradzić ze skropleniem gazów czystych. Już na tym etapie odnajdujemy ważny wątek polski, tzn. prace duetu polskich profesorów Uniwersytetu Jagiellońskiego: Karola Olszewskiego (1846-1915) i Zygmunta Wróblewskiego (1845-1888). Dokonali oni pionierskiego i wielkiego jak na ówczesne czasy osiągnięcia, czyli pierwszego w świecie skroplenia tlenu (5 kwietnia 1883) i kilka dni później skroplenia azotu (13 kwietnia 1883). Potem także innych gazów. Co ciekawe, jeszcze w tym samym miesiącu kwietniu 1883 r. świat się o tym dowiedział poprzez notatkę opublikowaną wspólnie przez naszych uczonych we francuskim czasopiśmie Comptes Rendus [1]. Portrety uczonych pokazano na rys. 1, wykorzystywaną przez nich aparaturę na rys. 2 i 3.

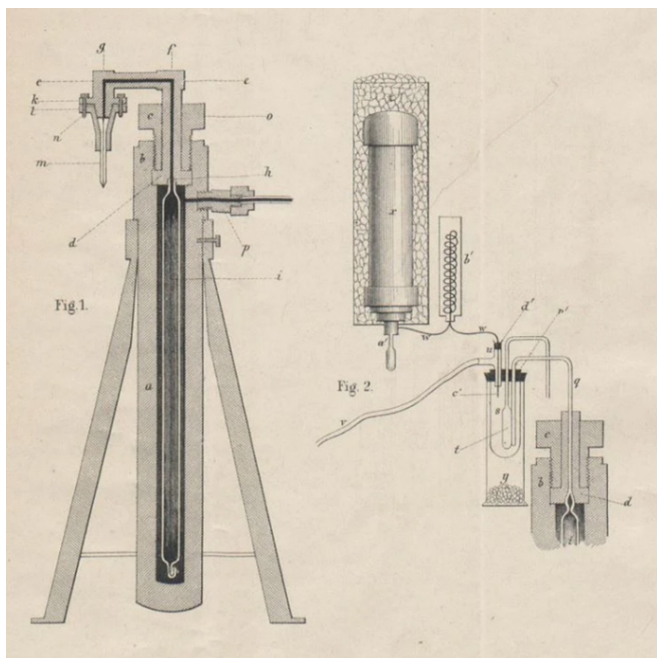


Rys. 1. Zygmunt Wróblewski i Karol Olszewski, Źródło: Wikimedia Commons, domena publiczna

Fig. 1. Zygmunt Wróblewski and Karol Olszewski, Source: Wikimedia Commons, public domain, author unknown



Rys. 2. Aparat do skraplania tlenu i azotu, 1883 (Encyklopedia PWN)
Fig. 2. Apparatus for liquefying oxygen and nitrogen, 1883 (PWN Encyklopedia)



Rys. 3. Aparatura prof. Zygmunta Wróblewskiego do eksperymentów ze skropleniem powietrza (Biblioteka Jagiellońska)

Fig. 2. Prof. Zygmunt Wróblewski's apparatus for experiments with air liquefaction (Jagiellonian Library)

Co prawda, po tym osiągnięciu drogi obydwu uczonych rozeszły się, ale pracując razem stanowili Zgrany Duet. Nazywani są „Ojcami światowej kriogeniki” oraz „Ojcami metody kaskadowej” wykorzystywanej do dziś w przemysłowych procesach skraplania czystych gazów i ich mieszanin, w tym do uzyskiwania LNG.

Motorem napędowym w metodzie kaskadowej jest zjawisko znane dziś jako efekt Joule’a-Thomsona. Zjawisko odkryte już w 1852 r. a opublikowane rok później [3]. Zjawisko Joule’a-Thomsona można opisać matematycznie wzorem (1), który określa tzw. współczynnik Joule’a-Thomsona (μ_T):

$$\mu_T = \left(\frac{\partial T}{\partial p} \right)_H \quad (1)$$

gdzie:

- μ_T – współczynnik Joule’a-Thomsona,
- $\left(\frac{\partial T}{\partial p} \right)_H$ – pochodna cząstkowa oznaczająca zmianę temperatury (gazu, mieszaniny gazów) ze zmianą ciśnienia, przy stałej entalpii (H), czyli bez wymiany ciepła z otoczeniem.

Współczynnik Joule’a-Thomsona jest wielkością charakterystyczną dla danego rodzaju gazu. Gdy gaz rzeczywisty przepływa przez zawór lub jakikolwiek dławik bez dopływu i odpływu ciepła, czyli gdy proces jest całkowicie adiabatyczny, to jego temperatura ulega zmianie. W większości przypadków ulega ochłodzeniu i wtedy współczynnik Joule’a-Thomsona przyjmuje wartości dodatnie. Jeżeli uda się doprowadzić gaz do bardzo niskiej temperatury, czyli temperatury skraplania, to gaz oczywiście skrapla się. Warto też wspomnieć, że są też takie gazy, które przy przepływie z dławieniem zachowują się nietypowo i ulegają ogrzaniu. Takimi gazami są: wodór, hel, neon.

Wracając do Duetu Wróblewski-Olszewski, to po udanych eksperymentach dotyczących skropleniu tlenu i azotu Zygmunt Wróblewski uległ bardzo poważnemu wypadkowi w swoim laboratorium. Doznał poważnych obrażeń podczas wybuchu i zmarł przedwcześnie w wieku zaledwie 43 lat. Karol Olszewski cieszył się długim i bardzo owocnym życiem zawodowym. Warto dodać, że był m.in. twórcą pierwszego w Polsce zdjęcia rentgenowskiego i tym samym konstruktorem pierwszego w kraju aparatu rentgenowskiego. Bardzo istotny jest natomiast fakt, że był dwukrotnie rozważany jako polski kandydat do Nagrody Nobla z dziedziny fizyki (1904, 1913) [3, 4].

Postaci obydwu polskich uczonych – Zygmunta Wróblewskiego i Karola Olszewskiego – przede wszystkim ich osiągnięć naukowych – są godne przypominania w dedykowanych artykułach i monografiach.

2. Kreatywny przedsiębiorca

Kolejnym wielkim nazwiskiem w historii rozwoju LNG był Carl von Linde (1842–1934), znany najbardziej jako założyciel koncernu Linde AG (w 1902 r.). Oprócz tego, że był kreatywnym przedsiębiorcą, to był także dobrze znanym i cenionym naukowcem. Od 1868 r. był związany z Uniwersytetem Technicznym w Monachium, gdzie w 1872 r. otrzymał tytuł „Profesora Inżynierii Mechanicznej”. Jego ważny wkład w rozwój LNG polegał na tym, że był twórcą pierwszej przemysłowej instalacji do skraplania gazów (1895). Wynalazek swój opatentował, najpierw na Wyspach Brytyjskich [5], a potem także w Szwajcarii [6]. Patenty te były ukierunkowane na pozyskiwanie ciekłego tlenu i azotu z powietrza, ale niewątpliwie przyczyniły się do rozwoju przemysłu kriogenicznego, w tym także LNG. Można więc twierdzić, że Carl von Linde nie wpłynął bezpośrednio na rynek LNG, ale jego wpływ pośredni jest wyjątkowo istotny i wyraźny.

3. Cudowny kolejny polski duet, a nawet trio

Następne lata to już polski czas i okres aktywności Wielkiej Polskiej Trójki. Początkowo był to duet. Około roku 1910 Władysław Szaynok, polski inżynier i przedsiębiorca o rodzinnych korzeniach węgierskich, poznał się z Marianem Wieleżyńskim,

polskim chemikiem i również przedsiębiorcą o korzeniach ormiańskich po stronie matki. Zarówno Szaynok jak i Wieleżyński, po wielu perturbacjach społeczno-politycznych, na początku XX w. związali się z przemysłem wydobywczym w ówczesnej Galicji. Obydwaj zwrócili uwagę na gaz ziemny, który towarzyszył wydobyciu ropy naftowej, ale był traktowany jako niebezpieczny produkt uboczny lub raczej odpadowy. Początkowo brak było pomysłów na wykorzystanie gazu ziemnego, który był niebezpieczny i powodował liczne wypadki z uwagi na swoją palność i wybuchowość. W tamtych czasach gaz ziemny był po prostu spalany w pochodniach.



Rys. 4. Polski Duet Gazowniczy: Władysław Szaynok (1876-1928) i Marian Wieleżyński (1879-1945), Źródło: Wikimedia Commons, domena publiczna

Fig. 4. Polish gas duo: Władysław Szaynok (1876-1928) i Marian Wieleżyński (1879-1945), Source: Wikimedia Commons, public domain, author unknown

Początkowo sam Marian Wieleżyński, a potem już razem z Władysławem Szaynokiem, prowadzili prace nad skraplaniem gazoliny w celu poprawy bezpieczeństwa transportu wydobytej ropy naftowej od miejsc wydobycia do miejsc jej przeróbki. Większym wyzwaniem było wykroplenie gazu ziemnego, do którego potrzebne były dużo „mocniejsze” kompresory. Idea zagospodarowania gazu ziemnego polegała wówczas na jego transporcie gazociągowym w fazie gazowej. Założona przez Mariana Wieleżyńskiego firma „Zakład Gazu Ziemnego Marian Wieleżyński Sp. z o.o.”, której wspólnikiem od 1911 r. był również Władysław Szaynok, wybudowała pierwszy w świecie gazociąg o długości 700 m łączący Kopalnię „Klaudiusz” z zakładem przetwórczym w Borysławiu. Skroplenie gazu ziemnego mogło zapewnić transport tego cennego paliwa na dłuższe odległości systemami innymi niż rurociągowo, ale cały czas była potrzeba posiadania bardzo silnych kompresorów. W roku 1912 austriacka firma Erdgass sprowadziła takie kompresory na potrzebę poprawy bezpieczeństwa pracy rafinerii w Drohobyczu i do obsługi dłuższego już, czternastokilometrowego gazociągu z Tusnowic do rafinerii w Drohobyczu wybudowanego również przy współudziale firmy „Zakład Gazu Ziemnego Marian Wieleżyński Sp. z o.o.”, jeszcze przed końcem 1912 r. Pojawia się pytanie, czy Marian Wieleżyński i Władysław Szaynok mieli możliwość wykorzystania tych kompresorów na potrzebę skroplenia gazu ziemnego do formy dzisiejszego LNG? Czy udało im się uzyskać LNG jeszcze w Polsce? Biorąc pod uwagę tzw. logikę faktów, to najprawdopodobniej TAK.

Pomimo, że nie istnieją powszechnie dostępne dokumenty o charakterze naukowo-technicznym dotyczące prac nad skraplaniem składników gazu ziemnego przez Wieleżyńskiego i Szaynoka na początku XX w. w Polsce (jak patenty, publikacje,

schematy czy opisy techniczne), to wydarzenia te są szczegółowo opisane w książce napisanej przez potomka Mariana Wieleżyńskiego – L. Wieleżyńskiego „Wspólna praca wspólny plon. Życie i dzieło mądrego człowieka” [7]. Książka ta wydana po raz pierwszy w 1934 r. dokumentuje życie prywatne i zawodowe Mariana Wieleżyńskiego oraz tych, którzy z nim współpracowali.

Pytanie czy LNG po raz pierwszy uzyskano w Polsce jest bardzo zasadne z uwagi na ciąg zdarzeń, jaki nastąpił zaraz po tych wydarzeniach w Polsce, ale jeszcze w roku 1912. Wzorcowo przeprowadzone budowy obydwu gazociągów spowodowały, że amerykańscy dostawcy kompresorów od razu zaprosili obydwu Polaków do Stanów Zjednoczonych, gdzie mieli okazję zapoznać się z zasadami funkcjonowania przemysłu gazowo-rafineryjnego w USA. Podróż rozpoczęła się już w roku 1913 [7, 8]. Ponieważ powodem podróży były te silne kompresory i możliwości stabilizacji frakcji węglowodorowych poprzez frakcjonowanie kaskadowe, dlatego z całą pewnością prowadząc badania przemysłowe w USA uzyskali tam LNG.

Jak wspomina L. Wieleżyński w swojej książce „Wspólna praca wspólny plon. Życie i dzieło mądrego człowieka” [7], obydwaj Polacy mieli wysokie uznanie w USA. Nie tylko ze względu na swoją wiedzę inżynierską, ale także ze względu, że obydwaj byli poliglotami, co w Ameryce zostało bardzo docenione. Jako Polacy na co dzień używali języka polskiego. Ponieważ pochodzili z Galicji, która była pod zaborem austriackim to płynnie mówili po niemiecku, ale posługiwali się także płynnie językiem francuskim i oczywiście angielskim. Doświadczenia amerykańskie były cenne, ale pobyt był krótki, ponieważ zdobytą nową wiedzę należało wykorzystać w Galicji, czyli w ówczesnej Polsce.

Po powrocie z USA ten Cudowny Duet przemianował się w Trio. Dołączył do nich kolejny utalentowany polski chemik – Ignacy Mościcki, późniejszy Prezydent RP (1926-1939). Zanim został wybrany na Prezydenta kraju to miał swoje ogromne zasługi naukowe, wynalazcze, także biznesowe. Wniósł ogromny wkład w rozwój polskiej chemii i przemysłu gazu ziemnego w Polsce. Dzięki niemu gaz ziemny zaczął być powszechnie stosowany w latach 30-tych w Polsce jako surowiec chemiczny – początkowo w Zakładach Azotowych w Tarnowie, zwanych później zakładami w Mościcach. Ta postać zasługuje na oddzielny dedykowany artykuł.

4. Etap komercjalizacji LNG

Za początkowy etap komercyjnego wytwarzania i wykorzystania LNG należy uznać instalację firmy East Ohio Gas Company uruchomioną w Cleveland w stanie Ohio w roku 1941. Wyprodukowane tam LNG służyło do magazynowania w celu późniejszego wykorzystania gazu po regazyfikacji na potrzeby zasilania sieci gazowej w okresach zwiększonego zapotrzebowania, czyli zimą. Po raz pierwszy w świecie wykorzystano fakt kompresji objętości gazu ziemnego po skropleniu co dało specyficzne możliwości jego magazynowania. Niestety, w instalacji tej w roku 1944 doszło do wybuchu, w wyniku którego zginęło ponad 100 osób. Po tym wypadku znacznie poprawiono standardy operacyjne dotyczące gazu skroplonego LNG.

Po II Wojnie Światowej świat znowu stanął na rozdrożu energetycznym. W Europie zniszczonej wojną i podzielonej politycznie brakowało tradycyjnych źródeł energii, czyli ropy i węgla. Faktycznie, na świecie dokonano dużych odkryć źródeł gazu ziem-

nego – w USA, Afryce Północnej, później na Bliskim Wschodzie, ale wówczas brak było długich międzynarodowych gazociągów. Wtedy zrodziła się idea skraplania LNG, aby można go było przewieźć statkiem i ponownie regazyfikować. Polski to jednak w okresie powojennym nie dotyczyło.

Absolutnym prekursorem wśród statków transportowych dla LNG był gazowiec Methan Pionier (Rys. 5). Był to gazowiec przebudowany ze statku transportowego wybudowanego w 1945 r. i początkowo nazwany Marline Hitch. Ostatecznie przebudowany w 1958 r. i ze zmienioną nazwą jako właśnie Methan Pionier odbył swój pierwszy rejs jako gazowiec w 1959. Operował między USA a Wielką Brytanią jako testowy projekt eksportu LNG z USA do Europy. Operował z Lake Charles w Luizjana, gdzie istniała mała instalacja do skraplania wybudowana przez Constock International Methane Ltd., do Convey Island w Wielkiej Brytanii (pierwszy w świecie terminal odbiorowy). Swój żywot gazowca ostatecznie zakończył w 1972 r. pod nazwą Aristotle. W okresie eksploatacji tego statku, od wybudowania do złomowania aż pięciokrotnie zmieniał nazwę [9].



Rys. 5. Pierwszy w świecie gazowiec Methan Pionier [9]
Fig. 5. The world's first gas carrier, the Methane Pionier [9]

Brytyjczycy byli pierwsi w Europie, którzy wdrożyli LNG do praktyki przemysłowej. Po sukcesach gazowca Methan Pionier uruchomiono komercyjny projekt importu LNG z Algierii do Wielkiej Brytanii. W Arzew w Algierii uruchomiono instalację CAMEL (Compagnie Aleienne de Methane Liquide) i od października 1964 r. regularnie transportowano LNG również do Convey Island. Wykorzystywano do tego celu początkowo gazowce Methane Princess i Methane Progress, każdy o pojemności 27000 m³.

Kolejny duży krok w światowym rozwoju LNG dokonała Japonia. Kraj ten mając bardzo ograniczone własne zasoby surowcowe szybko dostrzegł potencjał LNG. W roku 1969 rozpoczęto pierwszy azjatycki import LNG z terminala Kenai na Alasce USA do Japonii. Wkrótce potem Japonia stała się największym importerem LNG na świecie i tak jest do dziś.

W latach 70-tych nastąpił okres rosnących cen ropy naftowej i pierwszego kryzysu naftowego (1973). Zaczęto szukać alternatywnych źródeł energii a LNG był jednym z nich. Wtedy odnotowano rozwój terminali LNG w Hiszpanii, Francji, Korei Południowej. Algieria była wówczas głównym eksporterem LNG do Europy a Indonezja i Królestwo Brunei do Azji. W tym okresie LNG zaczyna łączyć kontynenty i powstaje światowa sieć gazu.

Lata 80-te to dekada nowych terminali LNG w USA, Japonii, Francji i Włoszech. W Katarze planuje się eksploatację bardzo dużego złoża North Field, które w przyszłości stanie się centrum

LNG świata. Pierwszy katarski megaprojekt LNG będzie uruchomiony w latach 90-tych. W tym czasie do grona eksporterów LNG dołączają też Trynidad i Tobago, Malezja i Australia. Po rewolucji łupkowej w USA w latach 2010-20 także USA stają się eksporterem LNG.

Dziś LNG to ponad 40% światowego handlu gazem do ponad 50 krajów. Światowa flota LNG to ponad 700 statków transportowych różnych typów i wielkości, w tym około 60 terminali pływających (FSRU i FSU) [10].

W Polsce zainteresowanie środowisk przemysłowych problematyką LNG jest znacznie dłuższe niż można byłoby to sobie wyobrazić. Oznacza to, że jest dłuższe niż od momentu podjęcia decyzji o budowie terminala morskiego do odbioru i regazyfikacji LNG w Świnoujściu. Już w latach 70-tych XX w. w instalacji odazotowania gazu ziemnego w Odolanowie PGNiG, w której odzyskiwano hel, LNG powstaje jako cenny produkt uboczny. W latach 1997-1998 LNG jest nawet eksportowany do Skandynawii jako paliwo do napędu pierwszych bałtyckich promów napędzanych za pomocą LNG [11]. Od lat siedemdziesiątych XX w. dla krajów skandynawskich Polska jest producentem LNG. Z uwagi na bliskość geograficzną polski przemysł gazowniczy był oczywistym celem współpracy firm skandynawskich, głównie szwedzkich, w pozyskiwaniu LNG. Chociaż nie były to ilości bardzo duże, to był to już tzw. obszar LNG średniej skali.

W roku 2001 uruchomiono w Polsce pierwszą stację regazyfikacji LNG, co było początkiem rozwoju LNG małej skali. W 2009 uruchomiono drugą instalację odazotowania gazów ziemnych w Grodzisku Wielkopolskim (PGNiG SA), gdzie LNG było również cennym produktem ubocznym. Z rozwojem obszaru LNG małej skali rozwijano także nowe techniki pomiaru ilości LNG z wykorzystaniem kriogenicznych przepływomierzy masowych Coriolisa – projekty SMOK rozwijane w Polskim Górnictwie Naftowym i Gazownictwie SA (obecnie ORLEN S.A.) w latach 2016–2020 [12, 13]. Projekty SMOK w połączeniu z wcześniejszymi projektami oceny jakości paliw gazowych [14, 15, 16] dały znaczący wkład w rozwój LNG małej skali zarówno w Polsce jak i w skali europejskiej.

W roku 2015 uruchomiono Terminal LNG w Świnoujściu (Gaz-System S.A.) i od tego momentu rozpoczął się w Polsce etap rozwoju LNG dużej skali.

5. Podsumowanie

Analiza rozwoju technologii skraplania gazu ziemnego w Polsce wskazuje, że LNG stopniowo ewoluowało z rozwiązania o charakterze marginalnym i lokalnym na ziemiach polskich na początku XX w. w istotny element światowego systemu energetycznego. Ostrożna analiza źródeł historyczno-technicznych sugeruje, że podstawowe zjawiska fizyczne związane ze skraplaniem i kondensacją gazów węglowodorowych mogły być rozpoznane na ziemiach polskich znacznie wcześniej niż wynikałoby to z oficjalnej chronologii rozwoju LNG. Początkowe zastosowania ograniczone do instalacji małoskalowych powiązanych z krajowym wydobyciem gazu, stanowiły podstawę do budowy kompetencji technologicznych i organizacyjnych w zakresie skraplania magazynowania oraz dystrybucji LNG na świecie.

Z perspektywy inżynierskiej historii LNG wynika, że rozwój technologii energetycznych nie jest wyłącznie funkcją dostępności surowców, lecz także rezultatem ciągłości myśli technicznej,

zdolności do eksperymentowania oraz transferu wiedzy pomiędzy epokami.

6. Bibliografia

- [1] Wróblewski Z., Olszewski K. (1883). Adnotacja o przełomowym odkryciu. *Comptes Rendus*, 96, s.1140.
- [2] Joule J.P., Thomson W. (1853). On the thermal effects of fluids in motion. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, 143, 357-365 <https://doi.org/10.1098/rstl.1853.0014>
- [3] Wróblewski, A. K. (2012). *Fizyka w Polsce wczoraj, dziś i jutro*.
- [4] Crawford, E., Heilbron, J. L., & Ulrich, R. (1987). *The Nobel population 1901–1937*
- [5] von Linde, C. (1896). Process and apparatus for liquefying gases or gaseous mixtures, and for producing cold, more particularly applicable for separating oxygen from atmospheric air. German Patent# GB189512528
- [6] von Linde, C. (1895). Gasverflüssigungs-maschine (Machine for the Liquefaction of Gas). CH Patent, 10704.
- [7] Wieleżyński. L. (1934). Wspólna praca wspólny plan. Życie i dzieło mądrego człowieka, Towarzystwo naukowe KUL.
- [8] Kozia, J. (2010). Gazolina – pierwsza polska spółka pracownicza. Liga Polityczna. Dostęp online: <https://www.rp-gospodarna.pl/gazolina.pdf>
- [9] Noble P. G., (2009), A Short History of LNG Shipping: 1959–2009. *Society of Naval Architects and Marine Engineers*.
- [10] International Gas Union. (2024). *LNG2024-02*. Dostęp online: <https://www.igu.org/advocacy/graphics-data/lng2024-02>
- [11] Jaskólski T. (2015). Dyrektor PGNiG SA w Odolanowie. Komunikat prywatny.
- [12] Rosłonek G., Bogucki A., Urbanowicz A., Kowalczyk S. (2019). Możliwości zastosowania przepływomierzy masowych typu Coriolis do pomiarów rozliczeniowych w obszarze LNG małej skali oraz innych cieczy kriogenicznych. *Nafta-Gaz*, 75 (10), 633-639. <https://doi.org/10.18668/NG.2019.10.05>
- [13] Rosłonek G. (2024). Cztery dekady rozwoju i zastosowania przepływomierzy Coriolisa jako urządzeń pomiarowych w gazownictwie. Możliwości zastosowania przepływomierzy masowych Coriolisa do pomiarów LNG. *Gaz Woda i Technika Sanitarna*, 1(98), 2-8. <https://doi.org/10.15199/17.2024.1.1>
- [14] Rosłonek G. (2005). Pomiary temperatury punktów rosy w gazach ziemnych. Część I. Przegląd metod do pomiaru temperatur punktów rosy wody. *Gaz Woda i Technika Sanitarna*, 7-8, 15-18.
- [15] Rosłonek G., Bojewski J., Sobczak M. (2005). Metoda poprawy precyzji analiz chromatograficznych gazów ziemnych poprzez kontrolowany sposób wprowadzania próbki na analizator w warunkach „barostatycznych”, *Gaz Woda i Technika Sanitarna*, 4, 7-9.
- [16] Rosłonek G., Sobczak M., Bojewski J. (2005). Nadzór metrologiczny nad laboratoryjnymi chromatografami gazowymi do kontroli jakości gazu ziemnego. *Analityka: nauka i praktyka*, 2, 27-33.



Krynica-Zdrój

15-17 kwietnia 2026 r.

JEDNA Z NAJWAŻNIEJSZYCH
KONFERENCJI WODOCIĄGOWYCH W POLSCE

WWW.HYDROPREZENTACJE.PL



HYDROPREZENTACJE

XXVIII edycja

2026





KATOWICE



Katowickie
Wodociągi

Główne Sekcje Branżowe Polskiego Zrzeszenia Inżynierów i Techników Sanitarnych

Główne Sekcje Branżowe od dekad stanowią merytoryczny fundament działalności Zrzeszenia. W ramach ich działalności koncentruje się ekspercka wiedza, praktyczne doświadczenie oraz inicjatywy odpowiadające na realne potrzeby poszczególnych sektorów inżynierii środowiska. Działając na styku nauki, praktyki projektowej i eksploatacyjnej, Sekcje pełnią rolę opiniotwórczą, edukacyjną i integrującą środowisko zawodowe.

W ostatnich latach rola sekcji branżowych wyraźnie się umocniła. W obliczu dynamicznych zmian technologicznych, transformacji energetycznej, rosnących wymagań środowiskowych oraz coraz bardziej złożonych regulacji prawnych, sekcje PZITS stały się przestrzenią rzeczowej debaty, wymiany doświadczeń i formułowania stanowisk eksperckich. Organizowane przez nie seminaria, konferencje, webinaria i spotkania techniczne nie tylko podnoszą kwalifikacje zawodowe członków, lecz także realnie wpływają na kierunki rozwoju poszczególnych branż.

Zapraszamy Państwa do zapoznania się z zakresem działalności poszczególnych Sekcji, a w przypadku pojawienia się pomysłów na nowe inicjatywy lub pytań o charakterze technicznym – do bezpośredniego kontaktu z Przewodniczącymi właściwych sekcji.



Główna Sekcja Gazownictwa

Główna Sekcja Gazownictwa skupia specjalistów zajmujących się projektowaniem, budową i eksploatacją sieci oraz instalacji gazowych, a także zagadnieniami bezpieczeństwa i niezawodności systemów gazowniczych. W ostatnich latach działalność sekcji koncentrowała się na aktualnych wyzwaniach sektora gazowego, wynikających zarówno z transformacji energetycznej, jak i zmian w otoczeniu regulacyjnym oraz technologicznym.

Sekcja była inicjatorem i współorganizatorem spotkań eksperckich, seminariów oraz webinariów poświęconych m.in. nowym paliwom gazowym, perspektywom wykorzystania wodoru w sieciach gazowych oraz problematyce bezpieczeństwa eksploatacji. Ważnym elementem jej aktywności są również spotkania integracyjne i wyjazdy techniczne, które sprzyjają wymianie doświadczeń pomiędzy projektantami, operatorami i przedstawicielami świata nauki. Działania sekcji mają charakter praktyczny i opiniotwórczy, a ich celem jest wspieranie środowiska branżowego w okresie dynamicznych zmian zachodzących w gazownictwie.

Istotnym obszarem działalności Głównej Sekcji Gazownictwa jest również nadzór i koordynacja współpracy międzynarodowej PZITS z International Gas Union (IGU). IGU jest światową organizacją zrzeszającą instytucje i stowarzyszenia branżowe związane z sektorem gazowym, której celem jest wspieranie zrównoważonego, bezpiecznego i efektywnego rozwoju gazownictwa na poziomie globalnym. Dzięki zaangażowaniu sekcji, polskie środowisko inżynierskie ma dostęp do międzynarodowych analiz, raportów i dobrych praktyk, a także możliwość uczestnictwa w dyskusjach dotyczących przyszłości gazu, w tym jego roli w transformacji energetycznej i rozwoju nowych paliw gazowych.

Przewodniczącym Sekcji jest kol. Paweł Stańczak



Główna Sekcja Wodociągów i Kanalizacji

Główna Sekcja Wodociągów i Kanalizacji pełni rolę w kształtowaniu standardów technicznych i eksploatacyjnych w obszarze gospodarki wodno-ściekowej. Jej działalność obejmuje zagadnienia związane z projektowaniem, modernizacją i eksploatacją systemów wodociągowych i kanalizacyjnych, ochroną zasobów wodnych oraz zapewnieniem bezpieczeństwa i jakości dostaw wody.

W ostatnim okresie sekcja aktywnie podejmowała tematykę ograniczania strat wody, modernizacji infrastruktury technicznej, niezawodności systemów oraz adaptacji sieci do zmieniających się warunków klimatycznych. Organizowane spotkania stanowiły forum wymiany doświadczeń pomiędzy przedstawicielami przedsiębiorstw wodociągowo-kanalizacyjnych, projektantami i środowiskiem naukowym.

Przewodniczącą Sekcji jest kol. Agnieszka Malesińska



Główna Sekcja Ciepłownictwa, Ogrzewnictwa, Wentylacji i Inżynierii Atmosfery

Sekcja Ciepłownictwa, Ogrzewnictwa, Wentylacji i Inżynierii Atmosfery obejmuje szerokie spektrum zagadnień związanych z wytwarzaniem i dystrybucją ciepła, systemami ogrzewania, wentylacji i klimatyzacji, a także jakością powietrza i efektywnością energetyczną. Jest to jedna z najbardziej interdyscyplinarnych sekcji, łącząca problematykę techniczną z aspektami środowiskowymi i zdrowotnymi.

W ostatnich latach sekcja była aktywnie zaangażowana w organizację i współorganizację konferencji branżowych, seminariów oraz debat technicznych poświęconych transformacji systemów ciepłowniczych, dekarbonizacji, modernizacji instalacji HVAC oraz nowym wymaganiom prawnym. Istotnym obszarem działalności jest również popularyzacja wiedzy poprzez publikacje techniczne i współpracę z wydawnictwami branżowymi. Sekcja stanowi ważne forum dyskusji nad kierunkami rozwoju instalacji sanitarnych w kontekście komfortu użytkowników, efektywności energetycznej i ochrony środowiska.

Ważnym elementem aktywności sekcji jest także współpraca międzynarodowa PZITS z REHVA – Europejską Federacją Stowarzyszeń Ogrzewnictwa, Wentylacji i Klimatyzacji. REHVA zrzesza narodowe organizacje branżowe z krajów europejskich i odgrywa kluczową rolę w kształtowaniu wytycznych, rekomendacji oraz stanowisk eksperckich dotyczących systemów HVAC, jakości środowiska wewnętrznego i efektywności energetycznej budynków. Dzięki zaangażowaniu sekcji w tę współpracę, doświadczenia i dorobek polskich inżynierów są włączane w europejską debatę techniczną, a krajowe środowisko ma dostęp do aktualnych wytycznych i trendów kształtujących rozwój instalacji sanitarnych w Europie.

Przewodniczącym Sekcji jest kol. Wojciech Ratajczak



Główna Sekcja Gospodarki Odpadami

Główna Sekcja Gospodarki Odpadami koncentruje swoją działalność na problematyce technicznej i organizacyjnej związanej z gospodarowaniem odpadami komunalnymi i przemysłowymi, oczyszczaniem miast oraz ochroną środowiska. Zakres jej zainteresowań obejmuje zarówno technologie przetwarzania i unieszkodliwiania odpadów, jak i zagadnienia systemowe związane z funkcjonowaniem gospodarki obiegu zamkniętego.

W ostatnich latach sekcja podejmowała tematykę nowoczesnych metod segregacji i recyklingu, odzysku surowców oraz dostosowania instalacji do zmieniających się wymagań prawnych.

Organizowane warsztaty miały charakter ekspercki i praktyczny, umożliwiając wymianę doświadczeń pomiędzy przedstawicielami branży, samorządów i środowiska naukowego. Działalność sekcji wpisuje się w aktualne wyzwania związane ze zrównoważonym rozwojem i odpowiedzialnym gospodarowaniem zasobami.

Przewodniczącym Sekcji jest kol. Piotr Manczarski



Główna Sekcja Techniki Instalacyjnej w Szpitalnictwie i Balneotechniki

Główna Sekcja Techniki Instalacyjnej w Szpitalnictwie i Balneotechniki skupia się na zagadnieniach projektowania, realizacji i eksploatacji instalacji sanitarnych w obiektach ochrony zdrowia oraz w obiektach uzdrowiskowych i balneologicznych. Jest to obszar wymagający szczególnej wiedzy i doświadczenia, ze względu na wysokie wymagania higieniczne, bezpieczeństwo użytkowników oraz specyfikę procesów medycznych i rehabilitacyjnych, a także stosowane zaawansowane rozwiązania światowej techniki.

W ostatnich latach działalność sekcji koncentrowała się na analizie rozwiązań technicznych stosowanych w szpitalach i sanatoriach, w tym systemów C-0, wentylacji, klimatyzacji, instalacji wodno-kanalizacyjnych oraz instalacji specjalnych np. gazów medycznych. Sekcja podejmowała również tematykę modernizacji istniejących obiektów oraz dostosowania ich do aktualnych standardów technicznych i sanitarnych. Jej działania mają istotne znaczenie dla podnoszenia jakości projektowania i eksploatacji obiektów o szczególnym znaczeniu społecznym.

Przewodniczącym Sekcji jest kol. Krzysztof Stelągowski

Nadchodzące Wydarzenia

Poniżej przedstawiono zestawienie nadchodzących wydarzeń związanych z działalnością Polskiego Zrzeszenia Inżynierów i Techników Sanitarnych. Obejmują one konferencje, szkolenia, seminaria oraz inne inicjatywy branżowe organizowane przez PZITS, jego struktury terenowe, a także wydarzenia realizowane pod patronatem Zrzeszenia. Wydarzenia te stanowią istotny element wymiany wiedzy, doświadczeń i dobrych praktyk w obszarze ciepłownictwa, ogrzewnictwa, wentylacji oraz techniki sanitarnej.

Konferencja Stormwater Poland 2026

Stormwater Poland 2026 to jubileuszowa edycja ogólnopolskiej konferencji poświęconej zagadnieniom gospodarowania wodami opadowymi, retencji oraz roli wody w kształtowaniu nowoczesnych i odpornych miast. Program wydarzenia oparto na czterech blokach tematycznych, których zakres odzwierciedla kluczowe zmiany zachodzące w polskiej hydrologii i inżynierii miejskiej w latach 2016–2026.

Pierwsza sesja poświęcona będzie bilansowi minionej dekady, w której wody opadowe z zagadnienia marginalnego stały się istotnym elementem polityki miejskiej. Przedstawione zostaną doświadczenia miast, operatorów systemów odwodnienia, projektantów oraz instytucji publicznych, obejmujące zarówno osiągnięcia, jak i wyzwania wymagające dalszych korekt kierunków działań.

Drugi blok tematyczny skoncentruje się na współwystępowaniu dwóch skrajnych zjawisk – długotrwałych okresów suszy oraz gwałtownych opadów prowadzących do lokalnych podtopień. Podkreślone zostanie znaczenie zintegrowanego podejścia do zatrzymywania i odprowadzania wody jako podstawy budowania odporności miast, a dyskusję uzupełni perspektywa regulacyjna i organizacyjna.

Trzecia sesja poświęcona będzie nowym technologiom zmieniającym praktykę inżynierską, w tym wykorzystaniu narzędzi cyfrowych, sztucznej inteligencji, cyfrowych bliźniaków systemów odwodnienia oraz rozwiązań wpisujących się w model gospodarki o obiegu zamkniętym, w których wody opadowe traktowane są jako lokalny zasób.

Ostatni blok tematyczny skupi się na roli wody w kształtowaniu przestrzeni miejskiej, ze szczególnym uwzględnieniem urbanistyki, architektury krajobrazu i planowania przestrzennego. Zaprezentowane zostaną przykłady rozwiązań, w których woda staje się elementem poprawiającym jakość życia, sprzyjającym tworzeniu funkcjonalnych i odpornych struktur miejskich.

Termin: 3–4 marca 2026 r.

Miejsce: Poznań, Sala Ziemi, Międzynarodowe Targi Poznańskie

Szczegóły: stormwaterpoland.com



V Konferencja Naukowo-Techniczna „Nowe wyzwania: kierunki gospodarki osadowej – od problemu do zasobu

Konferencja naukowo-techniczna poświęcona aktualnym wyzwaniom oraz kierunkom rozwoju gospodarki osadowej, ze szczególnym uwzględnieniem nowoczesnych rozwiązań technologicznych zgodnych z zasadami gospodarki o obiegu zamkniętym. Program wydarzenia obejmuje zagadnienia związane z zagospodarowaniem osadów ściekowych, ograniczaniem uciążliwości odorowych, stabilizacją i higienizacją osadów, odzyskiem biogazu oraz przekształcaniem termicznym osadów, a także aspekty technologiczne, prawne i ekonomiczne funkcjonowania instalacji. Wydarzenie objęte jest patronatem honorowym Polskiego Zrzeszenia Inżynierów i Techników Sanitarnych.

Termin: 3–4 marca 2026 r.

Miejsce: Białystok

Szczegóły: 2ktechnologie.pl/iv-konferencja-nowe-wyzwania-kierunki-gospodarki-osadowej-od-problemu-do-zasobu/



Szkolenie: Wentylacja obiektów obrony cywilnej

Szkolenie seminaryjne online poświęcone wymaganiom technicznym dla systemów wentylacji w obiektach obrony cywilnej, obejmujące zagadnienia stref wentylacji, doboru urządzeń oraz przykłady rozwiązań projektowych, w tym dla Miejsc Doraźnego Schronienia (MDS).

Termin: 9 marca 2026 r., godz. 11:00–14:00

Miejsce: szkolenie online

Szczegóły: pzits.com.pl/index.php/szkolenia-seminaryjne

Szkolenie: Zagadnienia projektowe i eksploatacyjne kanalizacji ciśnieniowej. Zarządzanie siecią

Szkolenie organizowane przez Oddział Katowice Polskiego Zrzeszenia Inżynierów i Techników Sanitarnych, poświęcone zagadnieniom projektowania, eksploatacji oraz zarządzania systemami kanalizacji ciśnieniowej. Program obejmuje warunki stosowania kanalizacji ciśnieniowej, rozwiązania techniczne w zakresie przydomowych, pośrednich i sieciowych przepompowni ścieków z pompami zatapialnymi, a także pompowni z wstępną separacją części stałych. Omówione zostaną zasady projektowania rurociągów tłocznych, zabezpieczeń pomp, instalacji do napowietrzania i płukania rurociągów oraz studzienek rozprężnych, jak również wybrane problemy eksploatacyjne, w tym zagadnienia związane z powstawaniem siarkowodoru i metodami czyszczenia rurociągów.

Termin: 5 marca 2026 r., godz. 11:00–14:00

Miejsce: szkolenie online

Szczegóły: pzits.com.pl/index.php/szkolenia-seminaryjne

Szkolenie: Zaawansowane metody podczyszczania wody opadowej – usuwanie zawiesiny trudnopadającej

Szkolenie poświęcone zagadnieniom projektowania urządzeń do retencji wód opadowych oraz metodom podczyszczania wody deszczowej, ze szczególnym uwzględnieniem usuwania zawiesiny trudnopadającej. Program obejmuje zagadnienia koagulacji i filtracji zanieczyszczeń, charakterystykę zanieczyszczeń zawieszonych i koloidalnych, a także rozwiązania techniczne z zakresu separatorów, filtrów oraz wielofunkcyjnych osadników i stawów retencyjnych.

Termin: 16 marca 2026 r., godz. 11:00–14:00

Miejsce: szkolenie online

Szczegóły: pzits.com.pl/index.php/szkolenia-seminaryjne

VI Konferencja Naukowo-Techniczna „Klimatyzacja obiektów szpitalnych”

VI edycja Konferencji Naukowo-Technicznej „Klimatyzacja obiektów szpitalnych”, poświęcona zagadnieniom projektowania, eksploatacji i oceny systemów HVAC w obiektach ochrony zdrowia, ze szczególnym uwzględnieniem bloków operacyjnych, diagnostyki obrazowej, medycyny nuklearnej oraz przestrzeni hospitalizacji specjalistycznej.

Program konferencji obejmuje wystąpienia eksperckie dotyczące mikrośrodowiska sal operacyjnych, kontroli bioaerozolu, komfortu cieplnego użytkowników, walidacji pomieszczeń o podwyższonych wymaganiach higienicznych oraz wpływu parametrów powietrza na poziom bezpieczeństwa klinicznego.

W gronie prelegentów VI Konferencji Naukowo-Technicznej „Klimatyzacja obiektów szpitalnych” znajdą się przedstawiciele środowiska klinicznego, epidemiologicznego, akademickiego oraz inżynierskiego, reprezentujący wiodące uczelnie techniczne, ośrodki medyczne i podmioty branżowe. Program tworzą wystąpienia ekspertów zajmujących się bezpieczeństwem mikrobiologicznym, projektowaniem i eksploatacją systemów HVAC w ochronie zdrowia, jakością środowiska wewnętrznego oraz rozwiązaniami technicznymi dla obiektów szpitalnych. Konferencję współtworzą specjaliści z uczelni krajowych i zagranicznych, organizacji branżowych oraz praktyki klinicznej i przemysłowej: **dr n. med. Anna Szczypka** (Bonifraterskie Centrum Medyczne sp. z o.o., Oddział III w Krakowie; Wydział Nauk o Zdrowiu Uniwersytetu Andrzeja Frycza Modrzewskiego w Krakowie; Konsultant Krajowy w dziedzinie pielęgniarstwa epidemiologicznego), **dr Lukas Schumann** (TU Berlin), **prof. dr hab. inż. Iwona Skoczko** (Politechnika Białostocka), **dr inż. Sylwia Szczęśniak** i **mgr inż. Radosław Niedzielski** (Politechnika Wrocławska), **dr inż. Amelia Staszowska** (Politechnika Lubelska) oraz **dr inż. Anna Rolewicz-Kalińska**, **mgr inż. Dominika Kwiecińska**, **mgr inż. Marcin Michalski**, **mgr inż. Vasco de Vasconcelos** i **dr hab. inż. Anna Bogdan**, prof. PW (Politechnika Warszawska). Tak dobrany skład prelegentów zapewnia połączenie wiedzy naukowej, doświadczeń projektowych, perspektywy użytkowników obiektów medycznych oraz praktyki wdrożeniowej.

Zakres tematyczny konferencji obejmuje m.in.:

- Źródła niepowodzeń w walce z zakażeniami w bloku operacyjnym
- The surgical microenvironment: what impacts its safety level?
- Temperatura projektowa w przestrzeniach hospitalizacji pediatrycznej – uwarunkowania kliniczne i implikacje projektowe
- Uwarunkowania projektowania instalacji HVAC w pracowniach diagnostyki obrazowej i medycyny nuklearnej
- Skuteczność naściennego elektrostatycznego oczyszczacza powietrza w zakresie usuwania bioaerozolu
- Rola temperatury w kształtowaniu ryzyka mikrobiologicznego w miejscach gromadzenia odpadów i w pomieszczeniach gospodarczych
- Nawilżanie powietrza w szpitalach – jakość wody jako klucz do jakości powietrza
- Izolacyjność cieplna obłożenia medycznych
- Walidacja sal operacyjnych – spojrzenie z innej strony
- Komfort cieplny użytkowników sal operacyjnych – wpływ systemu wentylacji.

Termin: 27 marca 2026 r.

Miejsce: wydarzenie online

Szczegóły: <https://pzits.pl/> lub <https://klimatyzacjawszpitalach.pl/>





Branżowe Centrum Umiejętności
w dziedzinie: instalacje sanitarne, grzewcze i gazowe
przy Zespole Szkół Budowlano-Drzewnych
im. Armii Krajowej w Żywcu

Zapraszamy na **Spotkania Hybrydowe w BCU nr 2 w Żywcu:**

🕒 10:00-12:00

📅 12 marca

Ogrzewanie i chłodzenie płaszczyznowe - rozwiązania na przykładzie systemów KAN-Therm

Prezentacja działalności firmy KAN – polskiego producenta systemów instalacyjnych – oraz omówienie podstaw teoretycznych ogrzewania i chłodzenia płaszczyznowego (wydajność, parametry pracy, punkt rosy).

Przegląd metod wykonania instalacji (systemy mokre i suche), elementów konstrukcyjnych oraz zasad doboru komponentów. Przedstawienie zastosowań specjalnych, m.in. ogrzewania powierzchni zewnętrznych, a także zasad wykonania wylewek i posadzek. Uzupełnieniem będzie krótka charakterystyka programów wspomagających projektowanie instalacji płaszczyznowych.

🕒 11:00-13:00

📅 19 marca

Ogrzewanie domu - mądre wybory- promocja nowoczesnych i efektywnych rozwiązań w branży OZE.

CZĘŚĆ OGÓLNA – J. Starościk (SPIUG)

Jak ogrzewać dom w kierunku samowystarczalności energetycznej? Omówienie ograniczania strat ciepła, roli OZE, zasad doboru źródła ciepła oraz współpracy elementów instalacji. Wprowadzenie do koncepcji smart home oraz wskazanie cech wiarygodnego producenta urządzeń grzewczych.

CZĘŚĆ PRAKTYCZNA – eksperci firm: GALMET, TECH Sterowniki, CALEFFI

Praktyczne rozwiązania dla nowoczesnych instalacji grzewczych: odzysk ciepła z wentylacji (rekuperacja) i integracja różnych źródeł ciepła (GALMET), automatyka i sterowanie systemami hybrydowymi (TECH Sterowniki) oraz kluczowe elementy instalacji CO z pompą ciepła – separacja zanieczyszczeń i powietrza, zabezpieczenia antyzamarzaniowe i zawory przełączające (CALEFFI).

🕒 10:00-12:00

📅 26 marca

Systemy oszczędzania, odzysku i recyklingu wody - w domu lub instytucji

Możliwości i sposoby rozwiązania odzysku wód opadowych i wody ze ścieków szarych
Dr inż. Florian PIECHURSKI

Przegląd zużycia wody w budynkach mieszkalnych i użyteczności publicznej oraz omówienie systemów odzysku wody deszczowej i szarej. Charakterystyka zanieczyszczeń, zbiorników, metod oczyszczania oraz warunków projektowania instalacji dualnych. Prezentacja praktycznych przykładów zastosowań – w obiekcie biurowym, krytej pływalni oraz domu studentkim.

Formuła spotkań: zajęcia prowadzone w trybie hybrydowym (udział stacjonarny lub online).

Rejestracja oraz Szczegóły: przez stronę internetową lub telefonicznie:

BRANŻOWE CENTRUM UMIEJĘTNOŚCI

przy Zespole Szkół Budowlano-Drzewnych im. Armii Krajowej

📍 ul. Szkolna 2, 34-300 Żywiec

☎ 33 861 21 75

✉ bcu@zsb.edu.pl



www.bcu.zsb.edu.pl

Projekt współfinansowany z Krajowego Planu Odbudowy i Zwiększania Odporności (KPO), Komponent A: Odporność i konkurencyjność gospodarki, Cel szczegółowy A3. Doskonalenie systemu edukacji, mechanizmów uczenia się przez całe życie w kierunku lepszego dopasowania do potrzeb nowoczesnej gospodarki, wzrostu innowacyjności, zwiększania transferu nowych technologii oraz zielonej transformacji, Inwestycja A.3.1.1. Wsparcie rozwoju nowoczesnego kształcenia zawodowego, szkolnictwa wyższego oraz uczenia się przez całe życie.



Rzeczpospolita
Polska

Sfinansowane przez
Unię Europejską
NextGenerationEU

