



**POLSKIE ZRZESZENIE
INŻYNIERÓW I TECHNIKÓW
SANITARNYCH**

CZASOPISMO WYDAWANE OD 1921 ROKU

Gaz Woda i Technika Sanitarna

Gas Water & Sanitary Engineering

8

2026



POLSKI KONGRES NAFTOWY I GAZOWNICZY

POWERING THE FUTURE

 21-22.10.2026

 Muzeum Historii Polski w Warszawie



Dołącz do ekspertów i liderów rynku.

**Porozmawiajmy o tym, co dalej
z energetyką, przemysłem, surowcami
i bezpieczeństwem.**



www.polishoilandgas.com

KOLEGIUM REDAKCYJNE / Editorial Board

REDAKTOR NACZELNY / Editor in Chief

prof. dr hab. inż. Andrzej J. Osiadacz

ZASTĘPCA REDAKTORA NACZELNEGO / Deputy Editor in Chief

dr inż. Piotr Jadwiszczak

REDAKTORZY / Editors

dr hab. inż. Zbysław Dymaczewski – Politechnika Poznańska

dr hab. inż. Wojciech Kostowski – Politechnika Śląska

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

dr hab. inż. Małgorzata Kwestarż – Politechnika Warszawska

dr inż. Piotr Manczarski – Politechnika Warszawska

dr hab. inż. Jerzy Mikosz – Politechnika Krakowska

dr Grzegorz Rosłonek – ORLEN S.A.

dr inż. Katarzyna Umiejewska – Politechnika Warszawska

RADA PROGRAMOWO-NAUKOWA / Scientific and Program Council

prof. dr hab. inż. Stanisław Nagy – Przewodniczący Rady –

Akademia Górniczo-Hutnicza

prof. Antonio Albuquerque – University of Beira Interior,
Portugaliaprof. 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 08/2026

Nakład: 230 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

Marcin Krocze, Gabriel Malanowski, Wojciech
KostowskiBadania szczelności połączeń sieci dystrybucyjnej
w aspekcie wykorzystania wodoru – część III:
efektywne współczynniki dyfuzjiTightness testing of distribution network
connections in terms of hydrogen use – part III:
effective diffusion coefficients..... 2

Paweł Czarnecki

Analiza porównawcza kosztów eksploatacji różnych
źródeł ciepłaComparative analysis of operating costs for various
heat sources 9Adam Rak, Sandra Tetlak-Kurowska, Artur Rolka,
Dominik RakWpływ powodzi na funkcjonowanie miejskiej
oczyszczalni ścieków w PaczkowieThe impact of flooding on the performance
of the municipal wastewater treatment
plant in Paczków 21

Martyna Michalik, Justyna Górka

Przydatność testów zlewkowych do doboru
polimerów stosowanych w odwadnianiu osadów
ściekowychThe suitability of jar tests for the selection of
polymers used in sewage sludge dewatering..... 29

Witold Paleczek

Nowoczesne metody bezinwazyjnej diagnostyki
nielegalnych podłączeń elektrycznych w kontekście
bezpieczeństwa instalacji gazowych i sanitarnychModern non-invasive diagnostic methods for
detecting unauthorized electrical connections in the
context of gas and sanitary installation safety..... 36

ARTYKUŁY PARTNERSKIE

Czas gazu i ropy jeszcze się nie skończył..... 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/

Badania szczelności połączeń sieci dystrybucyjnej w aspekcie wykorzystania wodoru – część III: efektywne współczynniki dyfuzji

Tightness testing of distribution network connections in terms of hydrogen use – part III: effective diffusion coefficients

Marcin Krocze^{1,3}, Gabriel Malanowski² , Wojciech Kostowski³ 

¹ Polska Spółka Gazownictwa

² Wydział Automatyki, Elektroniki i Informatyki, Politechnika Śląska

³ Wydział Inżynierii Środowiska i Energetyki, Politechnika Śląska

* Kontakt / Correspondence: wojciech.kostowski@polsl.pl

Streszczenie:

Artykuł jest kontynuacją części I oraz II, w których omówiono budowę stanowiska do badania szczelności elementów infrastruktury dystrybucji gazu ziemnego pod kątem zastosowania wodoru oraz zaprezentowano wyniki badań dla 2 kompensatorów dławicowych DN 150 po ich wieloletniej eksploatacji. Przeanalizowano strukturę uszczelnienia wraz z pomiarami kompresji, a następnie wyznaczono współczynniki dyfuzji. Uzyskane współczynniki wynoszą od ok. $2 \cdot 10^{-11}$ dla elementu nr 1 do $2,5 \cdot 10^{-9}$ m²/s dla elementu nr 2, co jest odpowiednio niższe oraz zgodne z wartościami literaturowymi dla pojedynczego uszczelnienia NBR. Skala strat wodoru dla sieci dystrybucyjnej jest oceniona jako niska, a skala ryzyka jako bardzo niska.

Słowa kluczowe: wodór, dyfuzja, sieci gazowe, dystrybucja, ryzyko, nieszczelność, przenikanie

Abstract:

This paper is a continuation of Part I and II, which presented the design of a test rig for investigating the leak tightness of natural gas distribution infrastructure components in the context of hydrogen blending along with experimental results of leakage tests performed on two DN 150 pipeline expansion joints after their long-term operation. The seal structure was analyzed together with compression measurements, and the diffusion coefficients were determined. The obtained diffusion coefficients ranged from approximately 2×10^{-11} m²/s for element No. 1 to 2.5×10^{-9} m²/s for element No. 2, representing values that are, respectively, lower than and consistent with those reported in the literature for a single NBR seal. The magnitude of hydrogen losses in the gas distribution network was assessed as low, while the associated risk level was evaluated as very low.

Keywords: hydrogen, diffusion, gas networks, distribution, risk management

Wykaz oznaczeń

C	– koncentracja, mol/m ³
D_{eff}	– efektywny współczynnik dyfuzji, m ² /s
J	– gęstość strumienia dyfuzji, mol/(s·m ²)
m	– masa, kg
n	– ilość substancji, mol
$\dot{n}$	– strumień substancji, mol/s
p	– ciśnienie, kPa
R_u	– stała gazowa, J/(mol K)
T	– temperatura, K
V	– objętość, m ³

x	– udział molowy, ppm
τ	– czas, s

Indeksy:

1	– początek pomiaru
2	– koniec pomiaru
Kreska nad symbolem np. $\bar{x}$ oznacza średnią z serii pomiarów	

1. Wstęp

W dyskusji o transporcie wodoru sieciami gazowymi zwraca się często uwagę, że z uwagi na małą cząsteczkę wodór jest gazem łatwo ulatniającym się na drodze dyfuzji przez co jego transport może być problematyczny. Z drugiej strony, producenci armatury i urządzeń a także turbin gazowych deklarują przystosowanie swoich produktów do pracy z wodorem. Zachodzi zatem potrzeba kwantyfikacji możliwych nieszczelności na drodze eksperymentalnej, a także określenia czy nieszczelności te mają znaczenie ekonomiczne (straty wodoru) lub mogą wpływać na bezpieczeństwo eksploatacji sieci, instalacji czy odbiorników gazowych z domieszką wodoru.

We wcześniejszych częściach niniejszej publikacji (Część I – projekt stanowiska i wstępne wyniki [4], Część II – badania eksperymentalne [5]) przedstawiono stanowisko badawcze do badania elementów sieci dystrybucyjnej w aspekcie możliwości zastosowania wodoru, przy czym skupiono się na elementach potencjalnie najłagodniejszych pod kątem szczelności, tj. kompensatory szkód górniczych.

W niniejszej, III części publikacji przedstawiono analizę procesu dyfuzji wodoru na podstawie przeprowadzonych pomiarów. Transport gazów, w tym wodoru, przez materiały uszczelniające zachodzi głównie na drodze dyfuzji i rozpuszczania, opisywanych m.in. prawem Ficka. Intensywność tego procesu zależy od struktury materiału, jego porowatości, temperatury, ciśnienia oraz właściwości fizykochemicznych gazów. Wodór jako gaz o najmniejszej cząsteczce, charakteryzuje się bardzo wysoką zdolnością do przenikania przez wiele materiałów, co czyni go szczególnie wymagającym medium z punktu widzenia szczelności.

W praktyce inżynierskiej stosowane są różnorodne materiały uszczelniające, takie jak elastomery (np. guma NBR), materiały włókniste (historycznie azbest), materiały grafitowe oraz kompozytowe materiały uszczelkowe typu klingeryt. Każdy z nich wykazuje odmienną odporność na przenikanie gazów. Materiały elastomerowe cechują się stosunkowo wysoką przepuszczalnością dla wodoru, wynikającą z ich struktury molekularnej, natomiast materiały grafitowe i kompozytowe charakteryzują się lepszą barierowością, szczególnie przy odpowiednim zagęszczeniu i docisku. Z kolei materiały azbestowe, obecnie wycofywane ze względu na szkodliwość, wykazywały specyficzne właściwości uszczelniające wynikające z ich włóknistej struktury.

Kwestie przenikalności i strat gazu są szeroko analizowane na wszystkich etapach łańcucha dostaw, w tym podczas magazynowania i transportu. W przypadku podziemnych magazynów wodoru, Carden i in. [3] analizowali ich szczelność, stwierdzając, że przy zastosowaniu skał pokrywowych jako naturalnej bariery, nieszczelności wynosiły około 2% w skali całego cyklu życia instalacji. Amid i in. [1] poprzez teoretyczną analizę zasugerowali, że w typowych warunkach straty wodoru spowodowane dyfuzją mogą zostać ograniczone do wartości poniżej 0,1%. Podczas analizy całkowitych strat należy uwzględnić również czynniki chemiczne, co wykazali Bo i in. [2]. Badając szczelność piaszczynowych zbiorników magazynowych stwierdzili oni, że w wyniku reakcji z kalcylem w środowisku solankowym całkowite straty wodoru wynoszą od 0,72% do 2,76% w okresie 30 lat eksplo-

atacji. Biorąc pod uwagę szczelność rurociągów przesyłowych oraz sieci dystrybucyjnej Niernann i in. [7], powołując się na dane Departamentu Energii USA (DOE, 2015. *Multi-Year research, development, and demonstration plan: 3. 2015. hydrogen delivery*, 2), przedstawili, że przy wykorzystaniu standardowej infrastruktury nieszczelności wynosiły poniżej 0,5% dla etapu transmisji oraz 0,02% dla etapu dystrybucji. Analizując infrastrukturę niskociśnieniową Mejia i in. [6] wykazali natomiast, że czysty wodór wycieka z instalacji z takim samym tempie jak mieszanina wódor/gaz ziemny, jak również czysty gaz ziemny.

Jak wprowadzono w Części II [5], w literaturze znane są badania dotyczące wpływu wodoru na uszczelnienia gumowe [10], a także badania szczelności wybranych połączeń mechanicznych prowadzone przez Instytut Nafty i Gazu do 15% dodatku wodoru [9]. Szczegółowy mechanizm fizyczny dyfuzji przez materiał został opisany przez Zhou z zespołem [11], który wyznaczył współczynnik dyfuzji na poziomie pomiędzy $1 \cdot 10^{-9}$ a $4 \cdot 10^{-9}$ m²/s dla materiału NBR oraz EPDM, który jednak nie jest stosowany w gazownictwie z uwagi na brak odporności na kontakt z olejami i paliwami węglowodorowymi. Ponadto, autorzy badali nasączenie materiałów uszczelnieniowych wodorem, stwierdzając, że guma NBR (stosowana m.in. w uszczelnieniach kompensatora) adsorbuje nieco mniej wodoru niż materiał EPDM.

Zasadniczym celem niniejszej pracy jest wyznaczenie efektywnego współczynnika dyfuzji oraz ilościowa ocena ryzyka eksploatacyjnego oraz ocena skali strat wodoru w odniesieniu do elementów sieci dystrybucyjnej.

2. Metodyka badań

2.1. Sposób prowadzenia pomiarów

Badania przeprowadzono na dwóch eksploatowanych kompensatorach dławicowych DN 150 PN16 (rys. 1) z wykorzystaniem stanowiska badawczego II generacji, opisanego szczegółowo w części I pracy [4]. Szczegółową metodykę i plan badań przedstawiono w części II pracy [5]. W skróconym ujęciu, badania miały następujący przebieg:

Dla elementu badanego nr 1: przeprowadzono 3-krotny pomiar przy użyciu 100% wodoru w warunkach zbliżonych do próby szczelności: po napełnieniu elementu wodorem do ciśnienia > 400 kPa oczekiwano 4 h na stabilizację parametrów, następnie rejestrowano parametry przez 24 h zarówno w elemencie badanym, jak i komorze stanowiącej jego otoczenie. W komorze badano także stężenie wodoru czujnikiem o zakresie 1000 ppm. Po zakończeniu próby następowało przedmuchiwanie elementu i komory azotem oraz postój min. 24 h.

Po trzykrotnym przeprowadzeniu próby przeprowadzono analogiczny test z użyciem azotu oraz metanu (stwierdzono przy tym opóźnione uwalnianie resztkowego wodoru z elementu).

Dla elementu badanego nr 2 przeprowadzono dodatkowo 2 próby kontrolne (N₂, CH₄) przed próbami zasadniczymi. Podczas tych prób nie stwierdzono obecności wodoru w komorze. Następnie przeprowadzono 3 próby zasadnicze (H₂), oraz jedną końcową próbę kontrolną (N₂), podczas której ponownie stwierdzono opóźnione uwalnianie resztkowego wodoru.

2.2. Objętość i zmiany ilości gazu, koncentracja wodoru

W celu wyznaczenia objętości przestrzeni pomiędzy zewnętrzną powierzchnią kompensatora a wewnętrzną powierzchnią komory badawczej zastosowano metodę opartą na II twierdzeniu Pappusa–Guldinusa, umożliwiającą określenie objętości bryły obrotowej na podstawie pola przekroju osiowego oraz położenia środka ciężkości analizowanej powierzchni:

$$V = A \cdot 2\pi r \quad (1)$$

gdzie:

A – pole przekroju wolnej przestrzeni, m^2

r – odległość środka ciężkości od osi obrotu, m

Wielkości A oraz r określono na podstawie modelu CAD. Dla $A = 0,16 m^2$ oraz $r = 0,098 m$ otrzymano $V = 0,985 m^3$.

Ilość gazu zawartą w elemencie oraz analogicznie w komorze określono za pomocą równania stanu gazu doskonałego podstawiając odpowiednie parametry p , T , V :

$$n = \frac{pV}{R_u T} \quad (2)$$

gdzie R_u jest uniwersalną stałą gazową równą $8,314 J/(mol \cdot K)$.

Zmiana ilości gazu $\Delta n = n_2 - n_1$, również wyznaczana osobno dla komory i dla elementu wskazuje, czy na podstawie równania stanu stwierdzono przyrost czy ubytek cząstek gazu.

Koncentrację wodoru (wyrażoną w mol/m^3) wyznaczono jako liczbę moli wodoru w jednostce objętości, przy czym liczbę moli wyznaczono na podstawie bezpośrednio zmierzonego udziału molowego x_{H_2} :

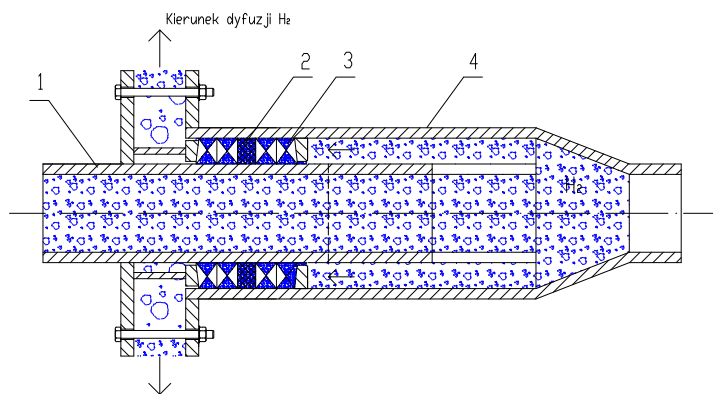
$$C_{H_2} = \frac{x_{H_2} \cdot n}{V} \quad (3)$$

Koncentrację wyznaczano zarówno dla elementu jak i komory, przy czym dla elementu przyjęto $x_{H_2} = 1$. Wyniki obliczeń dotyczące zmian ilości i koncentracji gazu przedstawiono w tabelach 3 i 4.

2.3. Stopień zaprasowania materiału

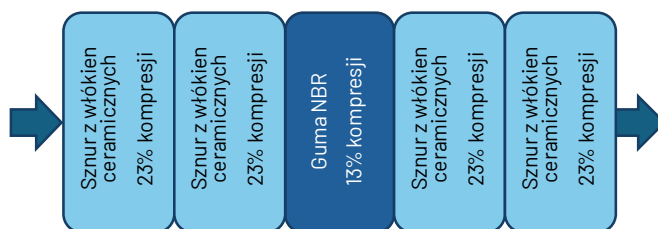
Wyznaczony w dalszym toku pracy współczynnik dyfuzji uwzględnia rzeczywiste warunki pracy uszczelnienia, w tym stopień kompresji sznura, wynikający z geometrii badanego połączenia i docisku materiału uszczelniającego. Kompresja ta odnosi się do rzeczywistych warunków badania, obejmujących geometrię uszczelnienia, stopień kompresji materiału, średniego ciśnienia próby $413,405 kPa$ oraz czasu trwania badania $24 h$. Konfiguracja geometryczna uszczelnienia w kompensatorze przedstawiona jest na rys. 1.

W analizowanym przypadku przegroda uszczelniająca została utworzona z czterech warstw sprasowanego sznura ceramicznego oraz jednej warstwy gumy NBR. Materiały te są obecnie stosowane w rozwiązaniach wykorzystywanych w gazownictwie. Uszczelnienie charakteryzuje się geometrią pierścieniową, obejmującą cały obwód dławicy kompensatora. Schemat budowy przegrody uszczelniającej oraz przekrój badanego elementu przedstawiono na rys. 2.



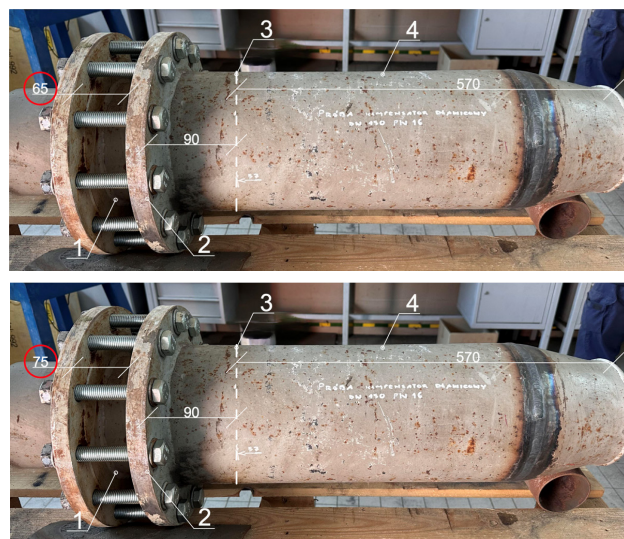
Rys. 1. Uszczelnienie dławicy kompensatora: 1) rura przewodowa DN 150, 2) warstwa uszczelniająca z gumy NBR, 3) warstwa uszczelniająca z plecionego włókna ceramicznego SiO_2 , 4) korpus kompensatora. Źródło: opracowanie własne

Fig. 1. Expansion joint gland seal: 1) DN 150 pipe, 2) NBR rubber sealing layer, 3) SiO_2 braided ceramic fibre sealing layer, 4) expansion joint body. Source: authors' own study



Rys. 2. Schemat uszczelnienia dławicy kompensatora-kolejność przegrody. Źródło: opracowanie własne

Fig. 2. Diagram of the expansion joint gland seal – sequence of the seal elements. Source: authors' own study



Rys. 3. Pomiar stopnia zaprasowania całości systemu uszczelnienia przed (65 mm) i po odkręceniu śrub montażowych (75 mm). Na rysunku: 1) dławica kompensatora, 2) kołnierz, 3) granica dławicy, 4) osłona. Źródło: opracowanie własne

Fig. 3. Permanent compression measurement for the entire sealing system before and after the mounting bolts have been removed. 1) expansion joint gland, 2) flange, 3) gland boundary, 4) cover. Source: authors' own study

Stopień sprasowania poszczególnych elementów uszczelnienia określono na podstawie pomiarów wymiarów materiałów – przedstawionych na rys. 3, przed zabudową oraz po ich wyjęciu z dławicy. Wyznaczony doświadczalnie efektywny współczynnik dyfuzji odnosi się do całej przegrody uszczelniającej pracującej przy rzeczywistym stopniu kompresji, który dla każdej warstwy wynosi:

$$K_i = \frac{h_0 - h_k}{h_0} \cdot 100 \% \quad (4)$$

gdzie:

K_i – stopień kompresji warstwy, %

h_0 – grubość warstwy przed kompresją, mm

h_k – grubość warstwy po sprasowaniu materiału, mm

Stopień kompresji całego układu obliczono uwzględniając sumaryczną grubość 4 warstw włókien ceramicznych oraz 1 warstwy gumy NBR, odpowiednio przed i po kompresji. Wyniki pomiarów przedstawiono w tabeli 4.

2.4. Proces dyfuzji, efektywny współczynnik dyfuzji

Rzeczywisty strumień przenikania wodoru przez badaną przegrodę uszczelniającą określono na podstawie I prawa Ficka, przyjmując, że proces dyfuzji zachodzi w warunkach ustalonych, a siłą napędową transportu jest różnica stężeń wodoru po obu stronach przegrody:

$$J = -D_{\text{eff}} \frac{\Delta C}{L} \quad (5)$$

gdzie:

J – gęstość strumienia przenikania, mol/(m²·s)

D_{eff} – efektywny współczynnik dyfuzji, m²/s

ΔC – różnica stężeń wodoru, mol/m³

L – droga dyfuzji, m

Z równania (5) można wyznaczyć efektywny współczynnik dyfuzji, w tym celu należy powiązać gęstość strumienia przenikania ze wzrostem liczby moli wodoru w jednostce czasu oraz z polem powierzchni przenikania:

$$D_{\text{eff}} = \frac{|\Delta n| \cdot L}{\Delta \tau \cdot A \cdot \Delta C} \quad (6)$$

gdzie:

$|\Delta n|$ – wartość bezwzględna przyrostu/ubytku molowego w trakcie próby, mol

$\Delta \tau$ – czas próby, s

A – pole powierzchni przenikania, m²

Różnicę stężeń wodoru przed i za przegrodą wyznaczono na podstawie jego ciśnień po obu stronach przegrody, przy czym po stronie elementu ciśnienie składnikowe równe jest całkowitemu (100% H₂), a po stronie komory ciśnienie cząstkowe wodoru jest bardzo niskie, i wynika ze średniego udziału molowego wodoru $\bar{x}_{H_2}$ w czasie trwania próby:

$$\Delta C = \frac{p_1 - \bar{x}_{H_2} p_2}{R_u \cdot T} \quad (7)$$

Wyniki obliczeń przedstawiono w sekcji 3.4.

Dyskusja: W równaniu (7) pojawia się ciśnienie cząstkowe wodoru po stronie komory. Jak wynika z badań (por. punkt 3), ciśnienie to wynosi zaledwie ok. 3–5 Pa. Taka wartość jest słuszna do obliczeń, jeżeli założyć, że podstawowym mechanizmem transportu wodoru jest statystyczny transport cząstek przez ma-

teriał opisany prawem Ficka (wnikanie do materiału po stronie elementu, przypadkowe ruchy cząstek przez element, odpływ cząstek wodoru z elementu do ośrodka gazowego w komorze). Tym niemniej, w przypadku uszczelnień kompensatora może zachodzić również inny mechanizm polegający na nieznacznym, ale makroskopowym przepływie gazu przez niewielkie, kapilarne kanały gazowe. Ten ruch jest zasadniczo jednokierunkowy i jest wywołany różnicą ciśnień całkowitych gazu, niezależnie od tego, czy po stronie wylotowej znajduje się azot, wodór czy inny gaz. Z tego względu należy podkreślić, że efektywny współczynnik dyfuzji stanowi statystyczne uśrednienie zjawiska transportu na potrzeby praktyczne, a nie precyzyjny opis jego rzeczywistego fizycznego charakteru.

2.5. Strumień molowy i oszacowanie skutków dla sieci dystrybucyjnej

Wyznaczony doświadczalnie strumień molowy dla pojedynczego kompensatora wynosi:

$$\dot{n} = J \cdot A \quad (8)$$

Natomiast roczną ilość wodoru utraconego z sieci ze wszystkich kompensatorów o tym samym rozmiarze, zabudowanych na sieci średniego ciśnienia można oszacować jako:

$$\Delta V_n \approx N \cdot \dot{n} \cdot \bar{v}_n \cdot \tau_r \quad (9)$$

gdzie:

N – liczba kompensatorów na sieci ($N = 7264$)

$\bar{v}_n$ – normalna objętość molowa, $\bar{v}_n = 0,02242 \text{ m}_n^3/\text{mol}$

τ_r – czas 1 roku wyrażony w sekundach ($8760 \cdot 3600 \text{ s}$)

Dodatkowo, można wyznaczyć ubytek masowy przyjmując gęstość normalną $\rho_n = 0,0899 \text{ kg/m}^3$. Wyznaczona wielkość dotyczy tylko kompensatorów DN 150 i stanowi oszacowanie górne, ponieważ część kompensatorów pracuje na niskim ciśnieniu, co wielokrotnie zmniejsza skalę zachodzącej w nich dyfuzji. Równocześnie, badane kompensator 1 i 2 dały znacząco różne wyniki, przez co również mogą one posłużyć do określenia dolnej i górnej granicy oszacowania. Precyzyjne określenie strat wymagałoby przebadania wszystkich eksploatowanych kompensatorów, co jest w praktyce niemożliwe. Wyniki obliczeń przedstawiono w sekcji 3.5.

3. Wyniki badań

3.1. Wyniki pomiarów zasadniczych

Bezpośrednie wyniki pomiarów zasadniczych realizowanych trzykrotnie na czystym wodorze dla obu elementów badanych przedstawiono w tabeli 1 oraz tabeli 2.

Jak można zauważyć, w każdej próbie zwiększała się koncentracja wodoru w komorze, jednak dla elementu 1 koncentracja wzrastała jedynie do ok. 60–90 ppm, podczas gdy dla elementu 2 koncentracja ta osiągała wartość kilkuset ppm, przy czym w dwóch przypadkach wartość bliską progowi czujnika wodoru osiągnięto po upływie krótszego czasu niż 24 h, co wymusiło wcześniejsze zakończenie próby.

Tabela 1. Wyniki pomiaru dla I cyklu badań. E – element badany: kompensator nr 1 DN 150 PN16, K – komora. Źródło: opracowanie własne

Table 1. Experimental results for the 1st cycle: E – tested element (expansion joint DN 150 PN16), K – testing chamber. Source: authors' own study

Wielkość	Jedn.	Próba 1		Próba 2		Próba 3	
		E	K	E	K	E	K
$X_{H2,1}$	Ppm		67,13		77,94		28,97
$X_{H2,2}$	Ppm		79,43		89,19		57,54
p_1	kPa	414,11	101,31	414,50	101,55	427,76	101,41
p_2	kPa	414,93	101,62	415,17	101,75	427,30	101,18
V	m ³	0,038	0,096	0,038	0,096	0,038	0,096
T_1	K	290,9	290,9	291,2	291,2	293,5	293,5
T_2	K	291,5	291,5	291,7	291,7	293,6	293,6
Δ_t	S	86 400		86 400		86 400	

Tabela 2. Wyników pomiaru dla II cyklu badań. E – element badany: kompensator nr 2 DN 150 PN16, K – komora. Źródło: opracowanie własne

Table 2. Experimental results for the 2nd cycle: E – tested element (expansion joint No. 2 DN 150 PN16), K – testing chamber. Source: authors' own study

Wielkość	Jedn.	Próba 1		Próba 2		Próba 3	
		E	K	E	K	E	K
$X_{H2,1}$	Ppm		32,19		89,88		3,979
$X_{H2,2}$	Ppm		997,79		992,59		601,888
p_1	kPa	432,96	101,39	426,26	101,41	418,36	101,43
p_2	kPa	431,97	101,65	422,14	101,06	416,62	101,37
V	m ³	0,038	0,0985	0,038	0,0985	0,038	0,0985
T_1	K	298,7	298,7	299,7	299,7	303,1	303,1
T_2	K	299,6	299,6	298,1	299,9	303,2	303,2
Δ_t	S	79 644		54 024		86 400	

3.2. Wyniki obliczeń ilościowych

Tabele 3 oraz 4 przedstawiają wyniki bilansu ilości gazu zrealizowanego dwiema metodami. W pierwszej części każdej z tabel przedstawiono obliczenie ilości gazu w elemencie oraz w komorze na początku oraz na końcu próby na podstawie objętości oraz zmierzonych parametrów stanu (ciśnienia i temperatury). Obliczenia te dotyczą całości gazu w każdym z obiektów (elemencie i komorze) bez rozróżnienia jego składu. W drugiej części każdej z tabel obliczono przyrost ilości wodoru w komorze na podstawie pomiaru jego stężenia czujnikiem elektrochemicznym. Dodatkowo, przedstawiono koncentrację wodoru w elemencie i w komorze.

Widoczne jest, że pomiar parametrów stanu nie jest wystarczający do zbadania i ilościowego określenia zjawiska dyfuzji. Teoretycznie należałoby oczekiwać następujących wyników:

- 1. Zmiana ilości gazu w elemencie jest zawsze ujemna (ubytek).
- 2. Zmiana ilości gazu w komorze jest zawsze dodatnia (przyrost).
- 3. Zmiany te są sobie równe (układ szczelny i izolowany od otoczenia).

Tabela 3. Bilans molowy gazów dla elementu badanego nr 1. E – element badany, K – komora. Źródło: opracowanie własne

Table 3. Molar balance of gases for element No. 1: E – tested element, K – testing chamber. Source: authors' own study

Wielkość	Jedn.	Próba 1		Próba 2		Próba 3	
		E	K	E	K	E	K
A. Wyniki na podstawie pomiaru ciśnienia, temperatury i objętości							
V	m ³	0,038	0,096	0,038	0,096	0,038	0,096
n_1	mol	6,506	4,021	6,507	4,027	6,661	3,989
n_2	mol	6,506	4,025	6,506	4,028	6,652	3,979
Δ_n	mol	0,000	+0,004	-0,001	+0,001	-0,009	-0,010
B. Wyniki na podstawie pomiaru koncentracji							
$X_{H2,1}-X_{H2,2}$	ppm		+12,30		+11,25		+28,57
C_1	mol/m ³	171,2	2,8·10 ⁻³	171,2	3,3·10 ⁻³	175,3	1,2·10 ⁻³
C_2	mol/m ³	171,2	3,3·10 ⁻³	171,2	3,7·10 ⁻³	175,0	2,4·10 ⁻³
Δ_n	mol		+4,94·10⁻⁵		+4,53·10⁻⁵		+1,14·10⁻⁴

Tabela 4. Bilans molowy gazów dla elementu badanego nr 2. E – element badany, K – komora. Źródło: opracowanie własne

Table 4. Molar balance of gases for element No. 2: E – tested element, K – testing chamber. Source: authors' own study

Wielkość	Jedn.	Próba 1		Próba 2		Próba 3	
		E	K	E	K	E	K
A. Wyniki na podstawie pomiaru ciśnienia, temperatury i objętości							
V	m ³	0,038	0,096	0,038	0,096	0,038	0,096
n_1	mol	6,625	3,919	6,500	3,907	6,309	3,864
n_2	mol	6,590	3,918	6,472	3,891	6,281	3,861
Δ_n	mol	-0,034	+0,001	-0,028	-0,015	-0,028	-0,004
B. Wyniki na podstawie pomiaru koncentracji							
$X_{H2,1}-X_{H2,2}$	ppm		965,60		902,71		597,909
C_1	mol/m ³	174,3	1,8·10 ⁻³	171,1	3,7·10 ⁻³	166,0	0,2·10 ⁻³
C_2	mol/m ³	173,4	40,7×10 ⁻³	170,3	40,2×10 ⁻³	165,3	24,2×10 ⁻³
Δ_n	mol		+3,78·10 ⁻³		+3,53·10 ⁻³		+2,31·10 ⁻⁴

W rzeczywistości wyznaczone przyrosty molowe nie są jednorodne, np. w próbie 1 elementu 1 wyznaczony ubytek gazu z elementu jest zerowy, w próbie 3 elementu 1 a także w próbach 2 i 3 elementu 2 następuje (wbrew oczekiwaniom) ubytek gazu z komory. W większości wypadków odnotowany jest niewielki ubytek molowy wodoru z elementu (E), co jest zgodne z fizyką zjawiska. Niejednorodne wyniki są związane z tym, że dyfuzja następuje również z komory do otoczenia (uszczelnienie manszetowe), a także z niepewnością pomiarów ciśnienia i temperatury.

Bardziej miarodajny jest pomiar elektrochemiczny, który jednoznacznie wskazuje na wzrost koncentracji wodoru w komorze, co pozwala na kwantyfikację migracji. Widoczne jest, że dla elementu nr 1 (bardziej szczelnego) migracja jest o dwa rzędy wielkości mniejsza niż rejestrowane zmiany ilości wg parametrów stanu, natomiast dla elementu nr 2 migracja jest mniejsza o jeden rząd wielkości. Z tego względu do dalszych rozważań dotyczących dyfuzji przyjęto wynik wg pomiaru elektrochemicznego.

3.3. Wyniki pomiarów kompresji

Tabela 5. Pomiary stopnia kompresji elementów uszczelnienia.
Źródło: opracowanie własne

Table 5. Measurements of the compression degree of sealing elements. Source: authors' own study

Element uszczelnienia	Wymiar przed h_o , mm	Wymiar po h_k , mm	Stopień kompresji K_i , %
Sznur z włókien ceramicznych	21,84	16,55	23,76
Guma NBR	22,30	19,54	12,38
Całość układu	109,66	86,14	21,45

Widoczne jest, że przegroda jako całość została zaprasowana o ok. 21,5%, przy czym sznur ceramiczny wykazuje większe odkształcenie (23,8%) niż warstwa gumy NBR (12,4%). Należy podkreślić, że wyniki stopnia kompresji dotyczą porównania fabrycznie nowych elementów z elementami wyjętymi z eksploatowanego wiele lat kompensatora. Staje się to widoczne po dodatkowej analizie stopnia kompresji ocenianego tylko na podstawie zewnętrznych wymiarów, tj. odległości między kołnierzami. Jak widać na rys. 3, odległość ta wynosi 65 mm w stanie eksploatacyjnym (zaprasowanym) oraz 75 mm po poluzowaniu śrub kompensatora, co daje 10 mm różnicy (stopień kompresji <10%), znacznie mniej niż wynikałoby z różnicy $109,66 - 86,14 = 23,52$ mm widocznej w tabeli 5. Oznacza to, że sprasowanie jest w znacznym stopniu nieodwracalne, a do oceny stopnia kompresji należy wykorzystać wymiar fabrycznie nowych elementów, tak jak to przedstawiono w tabeli 5.

3.4. Wyniki obliczeń procesu dyfuzji

Wyniki obliczeń procesu dyfuzji dla badanych elementów przedstawiono w tabelach 6 oraz 7.

Tabela 6. Obliczenia procesu dyfuzji elementu badanego nr 1.
Źródło: opracowanie własne

Table 6. Calculation of the diffusion process for element No. 1.
Source: authors' own study

Wielkość	Próba 1	Próba 2	Próba 3
Średni udział wodoru w komorze, $\bar{x}_{H_2}$, ppm	$7,33 \cdot 10^{-5}$	$8,36 \cdot 10^{-5}$	$4,33 \cdot 10^{-5}$
Różnica stężeń, ΔC , mol/m ³	170,9	171,2	175,2
Przyrost udziału wodoru w komorze, Δx_{H_2} , ppm	12,3	11,2	28,6
Molowy transport wodoru do komory, Δn , mol	$4,94 \cdot 10^{-5}$	$4,53 \cdot 10^{-5}$	$1,14 \cdot 10^{-4}$
Efektywny współczynnik dyfuzji, D_{eff} , m ² /s	$2,22 \cdot 10^{-11}$	$2,03 \cdot 10^{-11}$	$4,99 \cdot 10^{-11}$
Gęstość strumienia dyfuzji, J , mol/s m ²	$4,40 \cdot 10^{-8}$	$4,03 \cdot 10^{-8}$	$1,01 \cdot 10^{-7}$

Tabela 7. Obliczenia procesu dyfuzji elementu badanego nr 2.
Źródło: opracowanie własne

Table 7. Calculation of the diffusion process for element No. 2.
Source: authors' own study

Wielkość	Próba 1	Próba 2	Próba 3
Średni udział wodoru w komorze, $\bar{x}_{H_2}$, ppm	$5,15 \cdot 10^{-4}$	$5,41 \cdot 10^{-4}$	$3,03 \cdot 10^{-4}$
Różnica stężeń, ΔC , mol/m ³	173,7	170,1	165,4
Przyrost udziału wodoru w komorze, Δx_{H_2} , ppm	965,6	902,7	597,9
Molowy transport wodoru do komory, Δn , mol	$3,78 \cdot 10^{-3}$	$3,53 \cdot 10^{-3}$	$2,31 \cdot 10^{-3}$
Efektywny współczynnik dyfuzji, D_{eff} , m ² /s	$1,82 \cdot 10^{-9}$	$2,54 \cdot 10^{-9}$	$1,07 \cdot 10^{-9}$
Gęstość strumienia dyfuzji, J , mol/s m ²	$3,67 \cdot 10^{-6}$	$5,02 \cdot 10^{-6}$	$2,06 \cdot 10^{-6}$

Widoczne jest, że efektywny współczynnik dyfuzji jest o dwa rzędy wielkości wyższy dla elementu badanego nr 2. Wartości pomiędzy pomiarami tego samego elementu różnią się, jednak są podobnego rzędu. Wyniki dla elementu 2 są zbliżone do wartości dla pojedynczego uszczelnienia NBR raportowanego w literaturze [11], natomiast dla elementu 1 uszczelnienie o 2 rzędy wielkości lepsze. Do oszacowania skali strat w sieci dystrybucyjnej przyjęto wariant najlepszy (element 1, próba nr 2) oraz najgorszy (element 2, próba nr 2).

3.5. Wyniki oszacowania strat w skali sieci dystrybucyjnej

Oszacowanie strat w oparciu o najlepszy i najgorszy wynik pomiaru przedstawiono w tabeli 8. Wyniki te tworzą scenariusz optymistyczny oraz pesymistyczny. Przeprowadzone obliczenia wskazują, że przy zastosowanej konstrukcji uszczelnienia dławicy kompensatora, obejmującej warstwy sznura ceramicznego oraz gumy NBR, intensywność dyfuzyjnego przenikania wodoru jest bardzo mała, nawet dla warunku pesymistycznego.

Tabela 8. Estymacja skali dyfuzji dla kompensatora DN 150 oraz ich populacji w sieci. Źródło: opracowanie własne

Table 8. Estimation of the diffusion scale for a single DN 150 expansion joint, and for their entire population in the network. Source: authors' own study

Wielkość	Opt	Pes
Strumień molowy wodoru, n , mol/s	$1,32 \cdot 10^{-9}$	$6,53 \cdot 10^{-6}$
Ubytek roczny wodoru, Δn_i , m ³	0,00093	0,0462
Ubytek roczny ($N = 7264$), Δn , m ³	6,8	335,4
Ubytek masowy, Δm , Kg	0,61	30,2

4. Wnioski

Podstawowe wnioski z badań przedstawiono w części II artykułu. W oparciu o dodatkową analizę dotyczącą struktury uszczelniania, procesu dyfuzji oraz jego odniesienia do całości sieci dystrybucyjnej można wysnuć dodatkowe wnioski:

Element nr 1 był eksploatowany na sieci średniego ciśnienia, co mogło spowodować wyższy stopień kompresji niż dla elementu nr 2, gdyż uszczelnienie było przez wiele lat dodatkowo dociśnięte nadciśnieniem gazu.

Uzyskane wartości wskazują, że prawidłowo uszczelniona dławica kompensatora nie stanowi istotnego źródła strat gazu. W konsekwencji dyfuzyjne przenikanie wodoru przez tego typu przegrody nie powinno mieć znaczącego wpływu na bilans strat gazu w systemie.

Z punktu widzenia bezpieczeństwa, uzyskane wartości stężeń wodoru w otoczeniu źródła emisji osiągnęły w najgorszym przypadku wartości ok. 1000 ppm, tj. ok. 2,5% dolnej granicy wybuchowości. Dotyczy to celowo zamkniętej, doszczelnionej i niewentylowanej przestrzeni. W przypadku sieci gazowych, nie powstaje zatem istotne ryzyko, jednak w obiektach zamkniętych takich jak stacje gazowe czy budynki z instalacjami gazowymi niezbędny może być dodatkowy monitoring stężenia wodoru.

Kompensatory dławicowe są urządzeniami eksploatowanymi w warunkach podziemnych, gdzie otaczający grunt stanowi dodatkową barierę ograniczającą migrację wodoru. Tym samym prawdopodobieństwo wystąpienia zagrożenia wynikającego wyłącznie z dyfuzyjnego przenikania gazu przez uszczelnienie ulega dalszemu zmniejszeniu

Przedstawione wnioski pozostają jednak aktualne pod warunkiem, że kompensatory znajdują się w należytych stanie technicznym, a ich elementy uszczelniające zachowują swoje właściwości użytkowe. Założono zatem, że kompensator nie uległ degradacji wskutek procesów korozyjnych, starzenia materiałów uszczelniających ani odkształceń mechanicznych mogących prowadzić do utraty szczelności połączenia. W takich warunkach wyznaczony doświadczalnie efektywny współczynnik dyfuzji może stanowić wiarygodny wskaźnik oceny potencjalnego ryzyka związanego z przenikaniem wodoru przez dławice kompensatorów stosowanych w systemach dystrybucyjnych.

5. Literatura

- [1] Amid, A., Mignard, D., & Wilkinson, M. (2016). Seasonal storage of hydrogen in a depleted natural gas reservoir. *International Journal of Hydrogen Energy*, 41(12), 5549–5558. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2016.02.036>
- [2] Bo, Z., Zeng, L., Chen, Y., & Xie, Q. (2021). Geochemical reactions-induced hydrogen loss during underground hydrogen storage in sandstone reservoirs. *International Journal of Hydrogen Energy*, 46(38), 19998–20009. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2021.03.116>
- [3] Carden, P., & Paterson, L. (1979). Physical, chemical and energy aspects of underground hydrogen storage. *International Journal of Hydrogen Energy*, 4(6), 559–569. [https://doi.org/10.1016/0360-3199\(79\)90083-1](https://doi.org/10.1016/0360-3199(79)90083-1)
- [4] Kroczeek, M., Kostowski, W., & Kulik, K. (2025). Badania szczelności połączeń sieci dystrybucyjnej w aspekcie wykorzystania wodoru-część I: projekt stanowiska i wstępne wyniki. *Gaz, Woda i Technika Sanitarna*, 99(7/8), 12. <https://doi.org/10.15199/17.2025.7-8.2>
- [5] Kroczeek M., Malanowski G., Kostowski W., (2026). Badania szczelności połączeń sieci dystrybucyjnej w aspekcie wykorzystania wodoru – część II: wyniki badań. *Gaz, Woda i Technika Sanitarna* 100(7). <https://doi.org/10.65545/GWITS.2026.07.01>
- [6] Mejia, A. H., Brouwer, J., & Mac Kinnon, M. (2020). Hydrogen leaks at the same rate as natural gas in typical low-pressure gas infrastructure. *International Journal of Hydrogen Energy*, 45(15), 8810–8826. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.12.159>
- [7] Niermann, M., Timmerberg, S., Drünert, S., & Kaltschmitt, M. (2020). Liquid Organic Hydrogen Carriers and alternatives for international transport of renewable hydrogen. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 135, 110171. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110171>
- [8] Izba Gospodarcza Gazownictwa. (2025). ST-IGG-0902:2025. Gazociągi. Próby ciśnieniowe gazociągów stalowych. Warszawa: Izba Gospodarcza Gazownictwa.
- [9] Szewczyk, P., & Jaworski, J. (2020). Analiza wpływu dodatku wodoru do gazu ziemnego na szczelność połączeń mechanicznych wybranych elementów sieci i instalacji gazowych. *Prace Naukowe Instytutu Nafty i Gazu*. <https://doi.org/10.18668/PN2020.231>
- [10] Zheng, Y., Tan, Y., Zhou, C., Chen, G., Li, J., Liu, Y., Liao, B., & Zhang, G. (2020). A review on effect of hydrogen on rubber seals used in the high-pressure hydrogen infrastructure. *International Journal of Hydrogen Energy*, 45(43), 23721–23738. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.06.069>
- [11] Zhou, C., Huang, Y., Zheng, Y., & Hua, Z. (2024). Hydrogen permeation behavior of rubber sealing materials for hydrogen infrastructure: Recent advances and perspectives. *International Journal of Hydrogen Energy*, 59, 742–754. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2024.02.042>

Analiza porównawcza kosztów eksploatacji różnych źródeł ciepła

Comparative analysis of operating costs for various heat sources

Paweł Czarnecki^{1*}

¹ Biuro Audytów Energetycznych Sp. z o.o. Warszawa

* Kontakt / Correspondence: pczarnecki@bae.com.pl

Streszczenie:

W artykule wykonano analizę porównawczą kosztów eksploatacji różnych źródeł ciepła w zależności od ich względnej wydajności. Omówiono koszty występujące w przedsiębiorstwach ciepłowniczych oraz elektrociepłowniach, spośród których wybrane i poddane analizie zostały koszty zmienne o największym udziale w całkowitym koszcie prowadzenia przedsiębiorstwa. Przeanalizowano przykładowe charakterystyki sprawności źródeł ciepła i wyznaczono modele regresji wielomianowej, na podstawie których wyznaczono koszty eksploatacyjne. Opisano wpływ zmiennej sprawności na koszt pracy danego źródła ciepła i przedstawiono wnioski wynikające z przeprowadzonej analizy.

Słowa kluczowe: koszty operacyjne źródeł ciepła, koszty eksploatacyjne źródeł ciepła, zmienna wydajność źródeł ciepła

Abstract:

The article is a comparative analysis of operating costs for various heat sources depending on their relative load. The introduction describes costs in heating plants and CHP plants, dividing them into fixed and variable costs. Next, the variable costs that constitute the largest share of the total operating costs are selected and analysed in the following sections. This study demonstrates the efficiency characteristics of various heat sources and established polynomial regression models. Next, using these models, appropriate graphs of aggregate operational costs for each heat source are displayed and compared. In the final section, the impact of load-dependent efficiency on the total operating cost of a given heat source is described and conclusions drawn from the analysis are presented.

Keywords: operating costs of heat sources, part-load behaviour of heat sources

1. Wstęp

Wyznaczanie i analiza kosztów operacyjnych wytwarzania ciepła sieciowego jest ekonomicznym komponentem zarządzania ruchem jednostek wytwórczych i dostawami ciepła w systemach zasilanych z miksu różnych technologii wytwarzania ciepła. Stanowi również ważne kryterium wspierania decyzji o budowie, rozbudowie czy modernizacji źródeł ciepła sieciowego. Źródła te wykorzystywane są w ciepłowniach, elektrociepłowniach, elektrowniach zawodowych, czy w zakładach produkcyjnych. Wytworzone ciepło służy do zaspokojenia zapotrzebowania odbiorców, do wytworzenia energii elektrycznej oraz do celów produkcyjnych.

Koszty produkcji ciepła w koncesjonowanych przedsiębiorstwach ciepłowniczych na terenie Polski zostały opisane w raporcie Urzędu Regulacji Energetyki (URE) [8]. Badanie obejmuje działalność przedsiębiorstw w obszarze wytwarzania, przesyłu,

dystrybucji i obrotu ciepła. Wykonywane one są co roku i pozwalają określić stan sektora ciepłowniczego oraz dynamikę i tendencję jego zmian. Dzięki porównywaniu ze średnimi wynikami z analizowanych 397 przedsiębiorstw ciepłowniczych badania te pomagają w identyfikacji obszarów działalności przedsiębiorstw, które wymagają poprawy efektywności energetycznej. W tabeli 1 przedstawiono wykaz kosztów przedsiębiorstw ciepłowniczych w Polsce zgodnie z raportem URE [8] oraz wyznaczono ich udziały w całkowitym koszcie prowadzenia przedsiębiorstwa.

Największy udział w kosztach zmiennych mają koszty materiałów i energii. Głównym kosztem jest zakup paliwa technologicznego wraz z jego transportem – to ponad 25,48% całkowitego kosztu działalności ciepłowniczej w 2024 roku. Kolejny pod względem udziału koszt zmienny to koszt zakupu energii elektrycznej na potrzeby własne przedsiębiorstwa – to 2,49%.

W pozostałych kosztach znajdują się koszty zakupu uprawnień do emisji CO₂ z Systemu Handlu Uprawnieniami do Emisji (EU

ETS). Systemem objęte są ciepłownie i elektrociepłownie, które posiadają instalacje spalania paliw o mocy nominalnej większej 20 MW [27]. Według informacji z KOBiZE [29] przedsiębiorstwa ciepłownicze otrzymują przydziały darmowych uprawnień do emisji CO₂ – w 2024 roku otrzymywały 30% darmowych uprawnień do emisji CO₂. Zgodnie z decyzją podjętą 6 marca 2025 r. na posiedzeniu Komitetu UE ds. Zmian Klimatu Polska otrzymała dodatkową pulę 30% bezpłatnych uprawnień do emisji CO₂ dla ciepłownictwa do końca 2030 roku [15, 16].

Na opłaty za korzystanie ze środowiska składają się: emisja CO₂, emisja pyłów oraz innych substancji szkodliwych w spaliniach, jednakże zakłada się, że głównym kosztem w opłacie za korzystanie ze środowiska jest koszt emisji CO₂

Tabela 1. Rodzaje kosztów prowadzenia działalności ciepłowniczej w roku 2024 [8]
Table 1. Types of costs in heating and CHP plants in 2024 [8]

Rodzaj kosztu	Calkowity koszt [tys. PLN]	Udział [%]
KOSZTY OGÓŁEM działalności ciepłowniczej	42 250 572	100,00
w tym: koszty prowadzenia działalności ciepłowniczej	40 327 947	95,45
KOSZTY STAŁE:	13 601 387	32,19
amortyzacja	3 468 254	8,21
wynagrodzenia	2 946 759	6,97
świadczenia na rzecz pracowników	734 097	1,74
materiały i energia	2 707 680	6,41
w tym: materiały do remontów i konserwacji	202 164	0,48
usługi obce	2 129 990	5,04
w tym: remonty	767 252	1,82
podatki i opłaty	931 381	2,20
pozostałe koszty stałe	683 223	1,62
w tym: koszty dzierżawy majątku trwałego	310 323	0,73
KOSZTY ZMIENNE:	26 726 560	63,26
materiały i energia	21 786 080	51,56
w tym: paliwo technologiczne (wraz z kosztami transportu)	10 764 092	25,48
energia elektryczna	1 049 927	2,49
usługi obce	158 918	0,38
opłaty za korzystanie ze środowiska	804 247	1,90
pozostałe koszty zmienne	3 977 313	9,41
w tym: inne koszty z działalności ciepłowniczej	1 922 625	4,55
pozostałe koszty operacyjne, koszty usług dodatkowych i straty nadzwyczajne	925 084	2,19
KOSZTY FINANSOWE:	997 540	2,36
w tym: odsetki od kredytów bankowych	393 936	0,93

2. Metodyka obliczeń

Celem analizy było wyznaczenie i porównanie kosztów eksploatacyjnych różnych źródeł ciepła sieciowego w Polsce z uwzględnieniem ich względnej wydajności (obciążenia). W analizie uwzględniono wyłącznie koszty zmienne, do których zaliczono:

- koszt zakupu paliwa technologicznego,
- koszt zakupu energii elektrycznej na potrzeby własne źródła,

- koszt opłat za korzystanie ze środowiska związanych z emisją CO₂
 - koszt zakupu uprawnień do emisji CO₂ w ramach Systemu Handlu Uprawnieniami do Emisji (EU ETS) – jeżeli występują oraz uwzględniono poziom darmowych przydziałów.
- Analiza została przeprowadzona dla następujących technologii wytwarzania ciepła:
- kotłów opalanych węglem kamiennym,
 - kotłów opalanych biomasą,
 - kotłów współspalających węgiel kamienny i biomasę,
 - kotłów opalanych gazem ziemnym,
 - kotłów opalanych biogazem,
 - kotłów elektrycznych,
 - jednostek kogeneracyjnych zasilanych gazem ziemnym,
 - jednostek kogeneracyjnych zasilanych biogazem,
 - jednostki gazowo-parowej pracującej w skojarzeniu.

Dla każdego rodzaju źródła i paliwa określono charakterystykę sprawności w funkcji roboczej wydajności względnej. Względna wydajność zdefiniowano jako stosunek aktualnej mocy użytkowej źródła do jego mocy znamionowej. W przypadku jednostek kogeneracyjnych analizowano sprawność całkowitą uwzględniając jednoczesną produkcję energii cieplnej i energii elektrycznej.

Charakterystyki sprawności wyznaczono na podstawie danych producentów, danych eksploatacyjnych oraz informacji literaturowych. Dla każdej charakterystyki wykonano aproksymację za pomocą modeli regresji wielomianowej, które następnie wykorzystano do obliczenia sprawności źródła dla całego analizowanego zakresu względnej wydajności. Pozwoliło to wyznaczyć zmiany w zużyciu paliwa, emisji CO₂ oraz kosztach eksploatacyjnych w funkcji obciążenia źródła.

Koszt zakupu paliwa określano wykorzystując średnie ceny paliw obowiązujące w 2024 roku. W analogiczny sposób wyznaczano koszty zakupu energii elektrycznej na potrzeby własne urządzeń.

Wielkość emisji CO₂ obliczano zgodnie z metodyką KOBiZE, wykorzystując wskaźniki emisji przypisane do poszczególnych paliw. Na tej podstawie wyznaczano opłaty za korzystanie ze środowiska oraz koszty zakupu uprawnień do emisji CO₂ dla źródeł objętych systemem EU ETS. Dla biomasy, biogazu oraz energii elektrycznej nie uwzględniano kosztu zakupu uprawnień do emisji CO₂.

Na podstawie opracowanych modeli wyznaczono przebiegi jednostkowych kosztów eksploatacyjnych dla całego zakresu pracy analizowanych źródeł. Uzyskane wyniki posłużyły do oceny wpływu względnej wydajności, rodzaju paliwa, sprawności energetycznej oraz kosztów emisji CO₂ na ekonomikę wytwarzania ciepła sieciowego.

2.1. Sprawność źródła ciepła

Obliczenia kosztów eksploatacyjnych poszczególnych źródeł ciepła sieciowego opierają się na ich charakterystykach sprawności. Sprawności źródeł mogą być wyznaczone metodą bezpośrednią lub metodą pośrednią [19]. Metoda bezpośrednia to stosunek ciepła otrzymanego do ciepła dostarczonego. Oznacza to stosunek ilości energii cieplnej otrzymanej w medium energetycznym (ciepłej wodzie lub parze) do ilości energii dostarczonej do źródła ciepła w paliwie. Zgodnie z nomenklaturą zawartą

w ustawie o efektywności energetycznej [33] ciepło otrzymane w ciepłej wodzie lub parze technologicznej określane jest jako ciepło użytkowe Q_u (inaczej energia użytkowa), a energia dostarczona do kotła w postaci paliwa jako energia finalna Q_f . Sprawność źródeł ciepła metodą bezpośrednią wyznaczana jest według wzoru [19]:

$$\eta_{bezpośrednia} = \frac{Q_u}{Q_f} = \frac{m_{medium} \cdot (i_2 - i_1)}{m_{paliwa} \cdot WO} \quad (1)$$

gdzie:

- $\eta_{bezpośrednia}$ – sprawność wyznaczona metodą bezpośrednią
 Q_u – energia użytkowa w medium energetycznego (ciepła woda, para technologiczna), MJ
 Q_f – energia finalna w paliwie, MJ
 m_{medium} – masa otrzymanego medium energetycznego, t
 i_2 – entalpia medium energetycznego po dostarczeniu energii, MJ/t
 i_1 – entalpia medium energetycznego przed dostarczeniem energii, MJ/t
 m_{paliwa} – masa spalnego paliwa, t
 WO – wartość opałowa spalnego paliwa, MJ/t

Metoda pośrednia (metoda strat ciepła) polega na określeniu rodzaju i wielkości strat ciepła występujących w procesie spalania paliwa. Sprawność metodą pośrednią wyznaczana jest ze wzoru [19]:

$$\eta_{pośrednia} = 100 - \sum_{i=1}^n L_i \quad (2)$$

gdzie:

- $\eta_{pośrednia}$ – sprawność wyznaczona metodą pośrednią, %
 L_i – różne straty ciepła, %
 n – ilość różnych strat ciepła

Przykładowe straty ciepła, które mogą występować w kotłach to:

- straty w gorących suchych spalinach (ciepło w spalinach, które mają wyższą temperaturę od temperatury otoczenia i nie jest ono wykorzystywane),
- straty w parze, która powstała z wodoru w paliwie i usuwana jest wraz ze spalinami (ciepło utajone),
- straty w parze, która powstała z zawartości wilgoci w paliwie oraz w powietrzu i usuwana jest wraz ze spalinami (ciepło utajone),
- straty w niepełnym spalaniu paliwa (zbyt mała ilość tlenu do spalania pełnego i powstaje tlenek węgla),
- straty w niespalonym węglu w popiele lotnym oraz w żużlu (w kotłach węglowych, biomasowych),
- straty na odsalaniu (ciągłe odprowadzanie pewnej ilości wody z kotła w celu zmniejszenia koncentracji soli w wodzie kotłowej, duża zawartość soli w wodzie kotłowej może prowadzić do pienienia się wody) i odmulanu wody kotłowej (okresowe usuwanie wody z dna kotła, która może zawierać cząstki stałe oraz szlam) [31],
- straty ciepła przez przenikanie ciepła przez ścianki,
- straty ciepła przez promieniowanie.

W przypadku jednostek kogeneracyjnych wyznacza się sprawność całkowitą przez dodanie ilości wytworzonej energii elektrycznej do licznika wzoru (2).

$$\eta_{całkowita} = \frac{Q_u + E_{el}}{Q_f} \quad (3)$$

gdzie:

- $\eta_{całkowita}$ – sprawność całkowita
 Q_u – energia cieplna użytkowa w medium energetycznego (ciepła woda, para technologiczna), MJ
 E_{el} – energia elektryczna wytworzona przez generator, MJ
 Q_f – energia finalna w paliwie, MJ

2.2. Godzinowe zużycie paliwa

Znając moc cieplną użytkową (oraz moc elektryczną wytwarzaną w jednostkach kogeneracyjnych) źródła oraz przekształcając wzory na sprawności (1) i (3) można obliczyć moce cieplne w paliwie P_f . Przekształcając ponownie wzory (1) i (3) można obliczyć zużycie paliw w godzinie pracy źródła, co zostało przedstawione we wzorach (4) oraz (5).

Zużycie paliw stałych w godzinę:

$$\dot{m}_{paliwa} = \frac{P_f \cdot 3,6}{WO} \quad (4)$$

gdzie:

- $\dot{m}_{paliwa}$ – zużycie paliwa w godzinę, t/h
 P_f – moc cieplna w paliwie, MW
 WO – wartość opałowa spalnego paliwa, MJ/kg

Zużycie paliw gazowych w godzinę:

$$\dot{V}_{paliwa} = \frac{P_f \cdot 3600}{WO} \quad (5)$$

gdzie:

- $\dot{V}_{paliwa}$ – zużycie paliwa w godzinę, m³/h
 P_f – moc cieplna w paliwie, MW
 WO – wartość opałowa spalnego paliwa, MJ/m³

2.3. Emisja CO₂

Godzinowa emisja CO₂ ze spalnego paliwa obliczana jest metodą standardową opisaną w informacji ogólnej KOBiZE [21], zgodnie ze wzorem:

$$E_{CO_2} = P_f \cdot 0,0036 \cdot WE \quad (6)$$

gdzie:

- E_{CO_2} – emisja CO₂ ze spalnego paliwa, tCO₂/h
 P_f – moc cieplna w paliwie, MW
 WE – wskaźnik emisji CO₂ dla danego paliwa, kg/GJ

2.4. Koszt paliw i energii

Koszt paliwa węglowego na godzinie pracy kotła węglowego wyznaczano z wzoru (8):

$$k_{paliwa_w} = \dot{m}_{paliwa_w} \cdot C_{paliwa_w} \quad (7)$$

gdzie:

- k_{paliwa_w} – koszt paliwa węglowego, PLN/h
 $\dot{m}_{paliwa_w}$ – zużycie paliwa węglowego, t/h
 C_{paliwa_w} – cena węgla kamiennego, PLN/t

Koszt zakupu gazu ziemnego na godzinę pracy kotła gazowego bądź jednostki kogeneracyjnej zasilanej gazem ziemnym wyznaczano z wzoru (8):

$$k_{paliwa_g} = \dot{V}_{paliwa_g} \cdot C_{paliwa_g} \quad (8)$$

gdzie:

k_{paliwa_g} – koszt zakupu gazu ziemnego, PLN/h

P_f – zużycie gazu ziemnego, m³/h

C_{paliwa_g} – cena gazu ziemnego, PLN/m³

Koszt pozostałych paliw na godzinę pracy kotła / jednostki kogeneracyjnej wyznaczano ze wzoru (9):

$$k_{paliwa} = P_f \cdot 3,6 \cdot C_{paliwa} \quad (9)$$

gdzie:

k_{paliwa} – koszt paliwa, PLN/h

P_f – moc cieplna w paliwie, MW

C_{paliwa} – cena paliwa, PLN/GJ

Koszt zakupu energii elektrycznej na potrzeby własne kotłów oraz do zasilania kotłów elektrycznych wyznaczano ze wzoru (10):

$$k_{en_el} = P_{el} \cdot C_{en_el} \quad (10)$$

gdzie:

k_{en_el} – koszt zakupu energii elektrycznej, PLN/h

P_{el} – moc elektryczna, MW

C_{en_el} – cena energii elektrycznej, PLN/MWh

2.5. Opłaty za emisję CO₂

Koszt opłat za korzystanie ze środowiska z emisji CO₂ wyznaczano ze wzoru (11):

$$k_{CO_2} = E_{CO_2} \cdot C_{CO_2} \quad (11)$$

gdzie:

k_{CO_2} – koszt emisji CO₂, PLN/h

E_{CO_2} – emisja CO₂, tCO₂/h

C_{CO_2} – cena za emisję CO₂, PLN/tCO₂

W przypadku, gdy dany kocioł lub jednostka kogeneracyjna objęta była Systemem Handlu Upewnienieniami do Emisji (EU ETS), dodatkowy koszt uprawnień do emisji CO₂ wyznaczano ze wzoru (12):

$$k_{CO_2(ETS)} = 0,7 \cdot E_{CO_2} \cdot C_{CO_2(ETS)} \quad (12)$$

gdzie:

$k_{CO_2(ETS)}$ – koszt emisji CO₂ z Systemu Handlu Upewnienieniami do Emisji, PLN/h

E_{CO_2} – emisja CO₂, tCO₂/h

$C_{CO_2(ETS)}$ – cena uprawnień za emisję CO₂, PLN/tCO₂

2.6. Łączny koszt 1 MWh ciepła

Łączny koszt wytworzenia 1 MWh ciepła wyznaczano ze wzoru (13):

$$K_{\text{Łączny}} = \frac{k_{paliwa} + k_{en_el} + k_{CO_2} + k_{CO_2(ETS)}}{P_{u\dot{z}}} \quad (13)$$

gdzie:

$K_{\text{Łączny}}$ – łączny koszt operacyjny za wytworzenie 1 MWh ciepła użytkowego, PLN/MWh

k_i – koszty: zakupu paliwa, energii elektrycznej, opłat za korzystanie ze środowiska, zakupu uprawnień do emisji CO₂ (EU ETS), PLN/h

$P_{u\dot{z}}$ – wytwarzana moc cieplna użytkowa, MW

W przypadku jednostek kogeneracyjnych łączny koszt wyznaczano za wytworzenie 1 MWh łącznie ciepła i energii elektrycznej według wzoru (14):

$$K_{\text{Łączny}} = \frac{k_{paliwa} + k_{en_el} + k_{CO_2} + k_{CO_2(ETS)}}{P_{u\dot{z}} + P_{el}} \quad (14)$$

gdzie:

$K_{\text{Łączny}}$ – łączny koszt operacyjny za wytworzenie 1 MWh łącznie ciepła użytkowego i energii elektrycznej, PLN/MWh

k_i – koszty: zakupu paliwa, energii elektrycznej, opłat za korzystanie ze środowiska, zakupu uprawnień do emisji CO₂ (EU ETS), PLN/h

$P_{u\dot{z}}$ – wytwarzana moc cieplna użytkowa, MW

P_{el} – wytwarzana moc elektryczna, MW

Zużycie paliwa oraz wielkości emisji CO₂ poszczególnych kotłów i jednostek kogeneracyjnych zostały obliczone na podstawie danych z KOBiZE z 2024 r. [7]. Dodatkowo niektóre wartości opałowe przyjęto zgodnie z informacjami w kartach katalogowych danego kotła / źródła [13]. Analiza kosztów operacyjnych opiera się na średnich rocznych cenach w 2024 r. [3, 4, 5, 6, 8, 9].

3. Charakterystyki sprawności

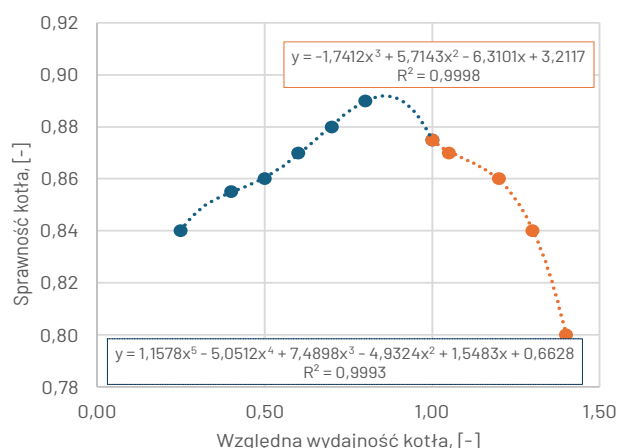
Charakterystyki przedstawiają zmianę sprawności danego źródła ciepła sieciowego w zależności od jego względnej wydajności, w całym zakresie technicznie dostępnych wydajności źródeł. Względna wydajność to stosunek mocy źródła ciepła w danym momencie do jego znamionowej mocy. Dla każdej charakterystyki wyznaczano model regresji wielomianowej oraz współczynnik determinacji, który określa jakość dopasowania modelu.

Producenci podają wartości sprawności wyznaczone z metody pośredniej lub metody bezpośredniej. W obliczeniach mocy cieplnej finalnej źródeł ciepła wykorzystywano wartości opałowe paliw niezależnie od tego, czy sprawności były wyznaczone metodą pośrednią, czy bezpośrednią, ponieważ wykorzystywane w obliczeniach kosztów eksploatacyjnych wskaźniki emisji CO₂ z KOBiZE odpowiadały wyłącznie podanej dla nich wartości opałowej [7].

Poniżej przedstawiono charakterystyki sprawności źródeł ciepła w zależności od obciążenia. W przypadku niektórych źródeł wyznaczano również charakterystyki względnej mocy elektrycznej na potrzeby własne. Jest to stosunek mocy elektrycznej pobieranej przez źródło w danym momencie do znamionowej mocy elektrycznej urządzeń pomocniczych źródła ciepła.

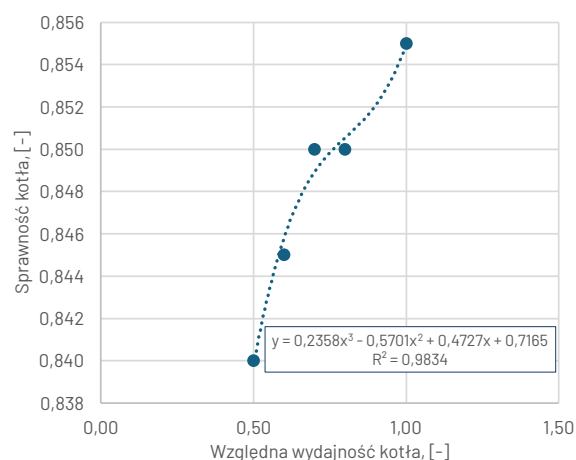
3.1. Kocioł węglowy WR

Jako kocioł węglowy analizie poddano kocioł wodny rusztowy (WR) firmy Sefako S.A. Na podstawie danych producenta wyznaczono ogólną charakterystykę sprawności (rys. 1) oraz charakterystykę względnej mocy elektrycznej pobieranej na potrzeby własne (rys. 2). Charakterystykę podzielono na dwie części: do znamionowej wydajności kotła oraz powyżej tej wartości do maksymalnej wydajności. Charakterystyka sprawności kotła węglowego WR pokazuje, że najwyższa sprawność źródła nie zawsze musi być w jego znamionowej wydajności.



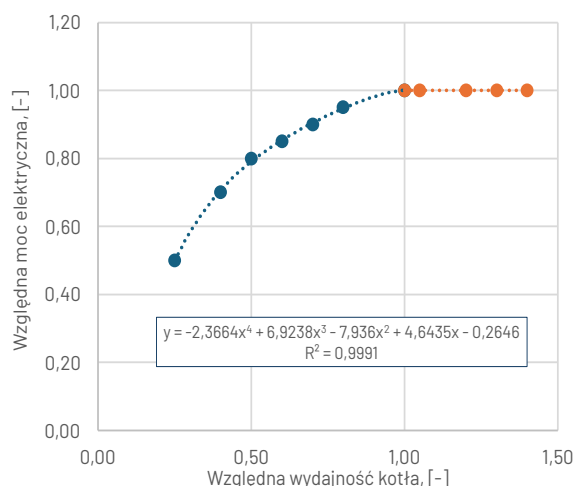
Rys. 1. Sprawność produkcji ciepła w zależności od względnej wydajności kotła węglowego WR. Źródło: opracowanie własne

Fig. 1. Heat generation efficiency depending on the relative load for WR coal-fired boiler. Source: author's own study



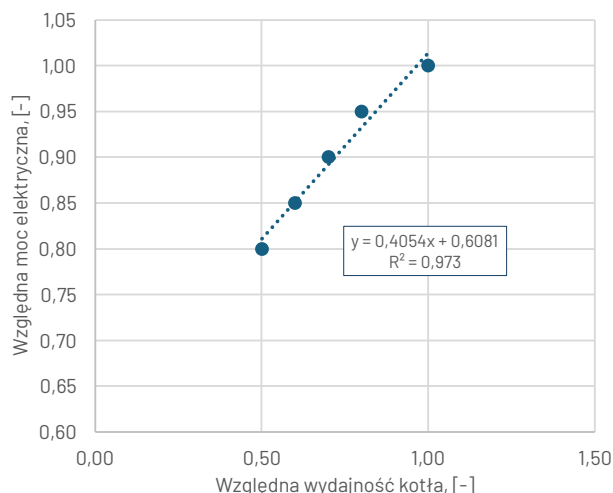
Rys. 3. Sprawność produkcji ciepła w zależności od względnej wydajności kotła biomasowego KBS-12. Źródło: opracowanie własne

Fig. 3. Heat generation efficiency depending on the relative load for the KBS-12 boiler. Source: author's own study



Rys. 2. Względna moc elektryczna na potrzeby własne w zależności od względnej wydajności kotła węglowego WR

Fig. 2. Relative electricity consumption depending on the relative load for WR coal-fired boilers. Source: author's own study



Rys. 4. Względna mocy elektrycznej na potrzeby własne w zależności od względnej wydajności kotła biomasowego KBS-12.

Źródło: opracowanie własne

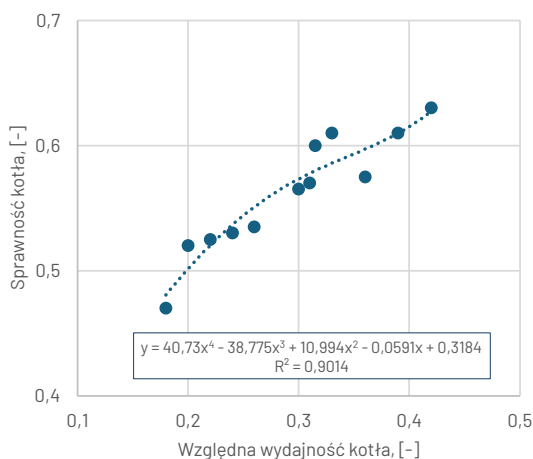
Fig. 4. Relative electric power consumption depending on the relative load for the Kbs-12 boiler. Source: author's own study

3.2. Kocioł biomasowy

Jako kocioł biomasowy do analizy przyjęto kocioł wodny rusztowy z rusztem schodkowym, na pelet lub zrębki, o oznaczeniu KBS-12 firmy Sefako S.A. [10]. Charakterystykę sprawności przedstawia rys. 3, a charakterystykę względnej mocy elektrycznej pobieranej na potrzeby własne rys. 4.

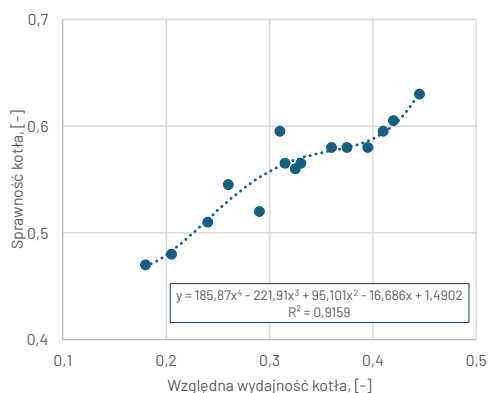
3.3. Współspalanie węgla i biomasy

Jako źródło ciepła sieciowego współspalającego węgiel i biomasę analizie poddano kocioł węglowy WR10. Dane przyjęto z artykułu [24], który opisuje pracę kotła WR10 i bada wpływ współspalania biomasy na jego sprawność. Na podstawie zamieszczonych sprawności kotła WR10, zależnych od udziału biomasy w spalanej paliwie, obliczono koszty operacyjne jego pracy dla udziału biomasy: 35%, 45%, 60% oraz 70% (rys. 5–8).



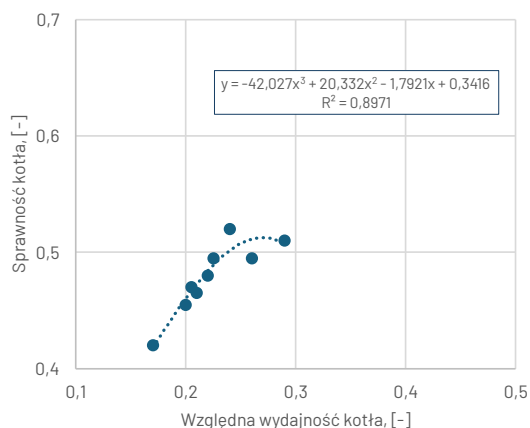
Rys. 5. Sprawność produkcji ciepła w zależności od względnej wydajności kotła WR10 z udziałem biomasy 35%. Źródło: opracowanie własne.

Fig. 5. Heat generation efficiency depending on the relative load for the WR10 boiler, 35% biomass share. Source: author's own study



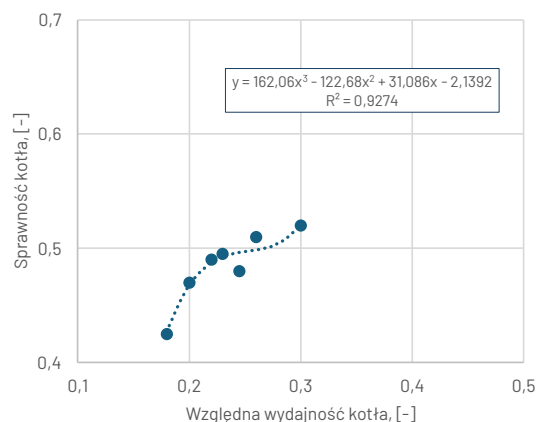
Rys. 6. Sprawność produkcji ciepła w zależności od wydajności kotła WR10 z udziałem biomasy 45%

Fig. 6. Heat generation efficiency depending on the relative load for the WR10 boiler, 45% biomass share. Source: author's own study



Rys. 7. Sprawność produkcji ciepła w zależności od względnej wydajności kotła WR10 z udziałem biomasy 60%. Źródło: opracowanie własne

Fig. 7. Heat generation efficiency depending on the relative load for the WR10 boiler, 60% biomass share. Source: author's own study



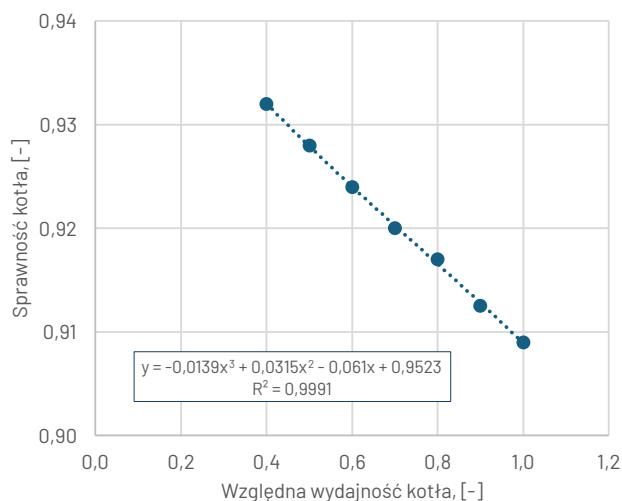
Rys. 8. Sprawność produkcji ciepła w zależności od względnej wydajności kotła WR10 z udziałem biomasy 70%. Źródło: opracowanie własne

Fig. 8. Heat generation efficiency depending on the relative load for the WR10 boiler, 70% biomass share. Source: author's own study

Przedstawione charakterystyki sprawności kotła WR10 różnią się od siebie w zależności od udziału biomasy w spalonym paliwie. Im większy udział biomasy, tym sprawność się zmniejsza.

3.4. Kocioł gazowy

Do analizy przyjęto kilka kotłów gazowych firm Viessmann Sp. z o.o. oraz LOOS Centrum Sp. z o.o. Względna moc elektryczna pobierana na potrzeby własne została przyjęta proporcjonalnie do względnej wydajności kotła, ponieważ takie informacje nie znajdowały się w kartach katalogowych kotłów. W przypadku kotłów gazowych, ich charakterystyka sprawności nieznacznie się zmienia w zależności od wydajności względnej (rys. 9).

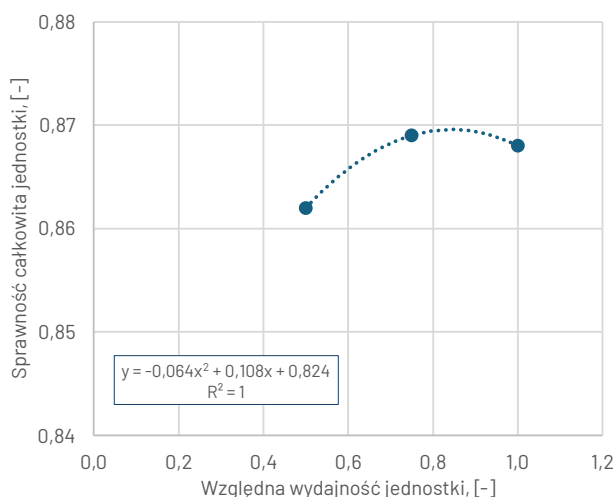


Rys. 9. Sprawność produkcji ciepła w zależności od względnej wydajności kotła Vitomax HW typ M70. Źródło: opracowanie własne

Fig. 9. Heat generation efficiency depending on the relative load for the Vitomax HW type M70 boiler. Source: author's own study

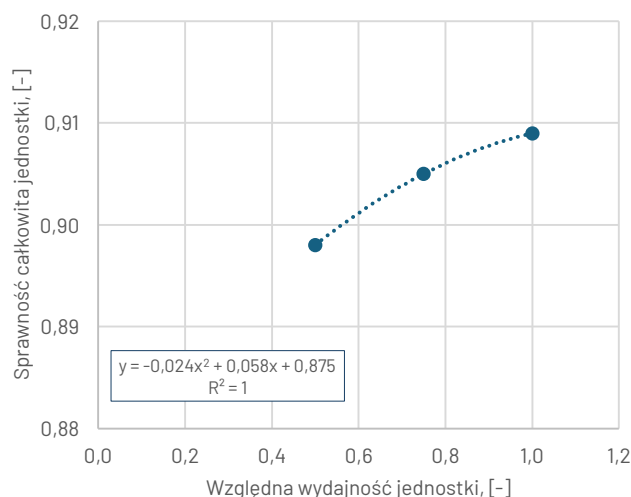
3.5. Gazowy układ kogeneracyjny

Jednostki kogeneracyjne przyjęte do analizy to jednostki Quanto 2300 firmy TEDOM Poland Sp. z o.o. Analizowane jednostki mogą być zasilane gazem ziemnym oraz biogazem. Opracowano charakterystyki sprawności całkowitej jednostek Quanto 2300 zasilanych gazem ziemnym (rys. 11) oraz biogazem (rys. 10).



Rys. 10. Sprawność całkowita w zależności od względnej wydajności jednostki biogazowej Quanto 2300. Źródło: opracowanie własne

Fig. 10. Total efficiency depending on the relative load for the biogas CHP unit Quanto 2300. Source: author's own study

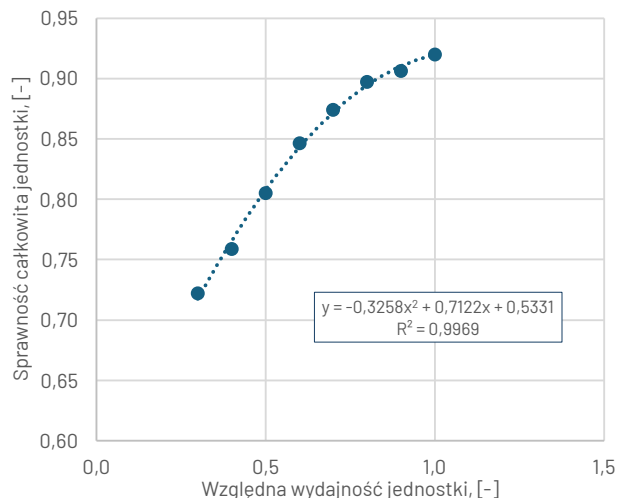


Rys. 11. Sprawność całkowita w zależności od względnej wydajności jednostki gazowej Quanto 2300. Źródło: opracowanie własne

Fig. 11. Total efficiency depending on the relative load for the gas CHP unit Quanto 2300. Source: author's own study

3.6. Gazowo-parowy układ kogeneracyjny

Dodatkowo przeanalizowano układ kogeneracyjny w elektrociepłowni Vuosaari B w Finlandii na podstawie danych przedstawionych w pracy magisterskiej o optymalizacji systemu ciepłowniczego w Finlandii [20, 22]. Elektrociepłownia Vuosaari B zasilana jest układem gazowo-parowym.



Rys. 12. Sprawność całkowita w zależności od względnej wydajności jednostki gazowo-parowej z elektrociepłowni Vuosaari B. Źródło: opracowanie własne

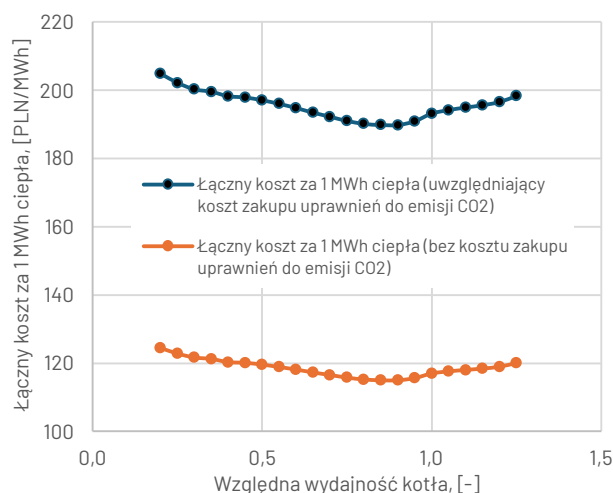
Fig. 12. Total efficiency depending on the relative load for the combined-cycle unit in power plant Vuosaari B. Source: author's own study

4. Koszty operacyjne

Na podstawie obliczeń z wykorzystaniem danych producentów oraz literaturowych wyznaczono łączne koszty operacyjne produkcji ciepła sieciowego w zależności od względnej wydajności danego źródła. Dla wszystkich analizowanych źródeł wyznaczono koszt wytworzenia 1 MWh ciepła sieciowego. Zgodnie z założeniami w niektórych przypadkach obliczano koszty operacyjne z uwzględnieniem kosztu zakupu uprawnień do emisji CO₂ lub bez uwzględnienia tego kosztu

4.1. Kocioł węglowy WR

Dla kotła WR8 obliczono dwa warianty (z i bez ETS), ponieważ moc kotła jest mniejsza niż 20 MW i możliwa jest sytuacja, w której łączna moc zainstalowana w ciepłowni również będzie mniejsza niż 20 MW – wówczas ciepłownia nie ponosi kosztu uprawnień do emisji CO₂. Największy łączny koszt operacyjny występuje dla względnej wydajności 20%. Z uwzględnieniem ETS wynosi 204,85 PLN/MWh, a bez ETS wynosi 124,46 PLN/MWh. Uprawnienia do emisji CO₂ dla analizowanego kotła węglowego mogą zwiększyć łączny koszt operacyjny wyprodukowania 1 MWh ciepła nawet o 65%. „Charakterystyka kotła sprawia, że różnica pomiędzy największym i najmniejszym łącznym kosztem operacyjnym wynosi 15,06 PLN/MWh w przypadku wariantu z uwzględnieniem uprawnień do emisji CO₂ i 9,43 PLN/MWh dla wariantu bez uwzględnienia tego kosztu.

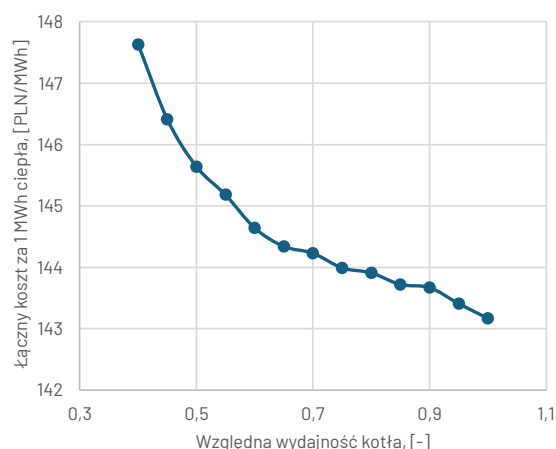


Rys. 13. Koszt operacyjny 1 MWh ciepła z kotła węglowego WR8 bez i z uwzględnieniem kosztu zakupu uprawnień do emisji CO₂ w zależności od względnej wydajności kotła. Źródło: opracowanie własne

Fig. 13. Total operating cost per 1 MWh of heat for the WR8 coal-fired boiler excluding and including the cost of CO₂ emission. Source: author's own study

4.2. Kocioł biomasowy

Kotły biomasowe nie są objęte Systemem Handlu Uprawnieniami do Emisji [7, 27], dlatego nie został ujęty koszt zakupu uprawnień do emisji CO₂. Jednakże spalaniu biomasy towarzyszy emisja CO₂ i należy za nią uiścić opłatę za korzystanie ze środowiska. Różnica pomiędzy największym i najmniejszym kosztem operacyjnym wynosi 4,46 PLN/MWh. Największy koszt eksploatacyjny wyniósł 147,63 PLN/MWh dla względnej wydajności 40%, a najmniejszy wyniósł 143,17 PLN/MWh dla wydajności znamionowej. Ta mała różnica wynika z małej zmienności sprawności analizowanego kotła w zależności od względnej wydajności.



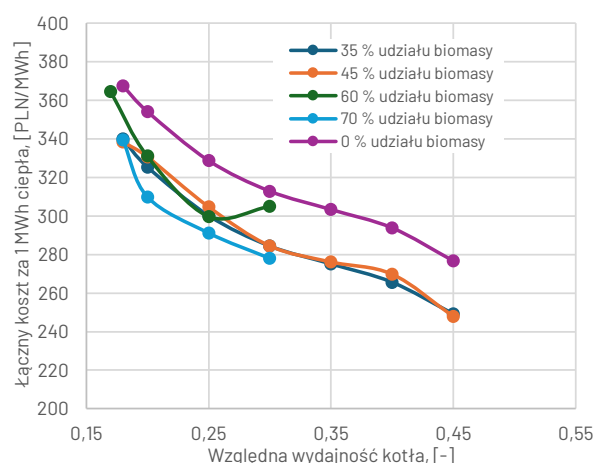
Rys. 14. Łączny koszt operacyjny 1 MWh ciepła w zależności od względnej wydajności kotła biomasowego KBs-12. Źródło: opracowanie własne

Fig. 14. Total operating cost per 1 MWh of heat depending on the relative load for the KBs-12 biomass boiler. Source: author's own study

4.3. Współspalanie węgla i biomasy

Koszt wytwarzania 1 MWh ciepła w źródle współspalające węgiel i biomasę wyznaczona dla kotła WR 10. Analizowano rosnące udziały biomasy w strumieniu spalanego paliwa. Różnica pomiędzy największym i najmniejszym kosztem operacyjnym może wynosić nawet 90,76 PLN/MWh (w przypadku udziału biomasy 35%).

Współspalanie biomasy z węglem kamiennym obniża koszt związany z zakupem uprawnień do emisji CO₂. Jednak dodając biomasę o mniejszej wartości opałowej niż węgiel kamienny, obniża się sprawność kotła. Mniejsza sprawność kotła powoduje większe zużycie paliwa, co zwiększa koszt zakupu paliwa. Zastosowanie biomasy może obniżyć ostateczny koszt operacyjny kotła WR10. Trudno jednoznacznie stwierdzić, jaki udział biomasy powinien być stosowany do obniżania łącznego kosztu operacyjnego. W przypadku udziału biomasy 35% oraz 45%, koszty operacyjne dla różnej względnej wydajności nie różnią się znacząco od siebie. Zwiększenie udziału do 60% spowodowało zwiększenie łącznych kosztów operacyjnych, lecz przy zwiększeniu udziału biomasy do 70% łączne koszty eksploatacyjne uległy obniżeniu do najniższych wartości spośród badanych przypadków.



Rys. 15. Łączny koszt operacyjny 1 MWh ciepła w zależności od względnej wydajności kotła WR10 dla różnych udziałów biomasy.

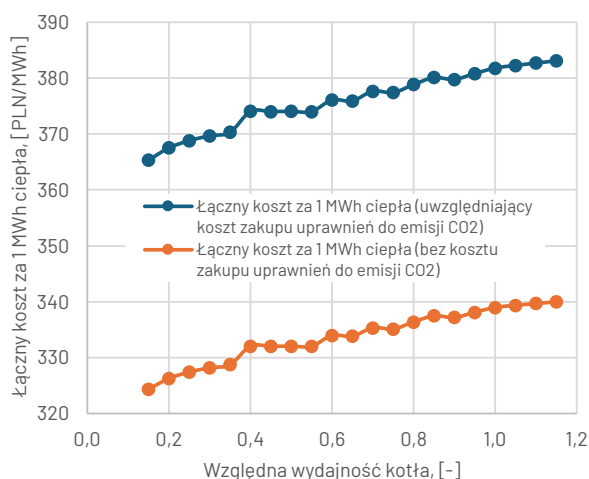
Źródło: opracowanie własne

Fig. 15. Total operating cost per 1 MWh of heat for the WR10 boiler at various biomass shares. Source: author's own study

4.4. Kocioł gazowy

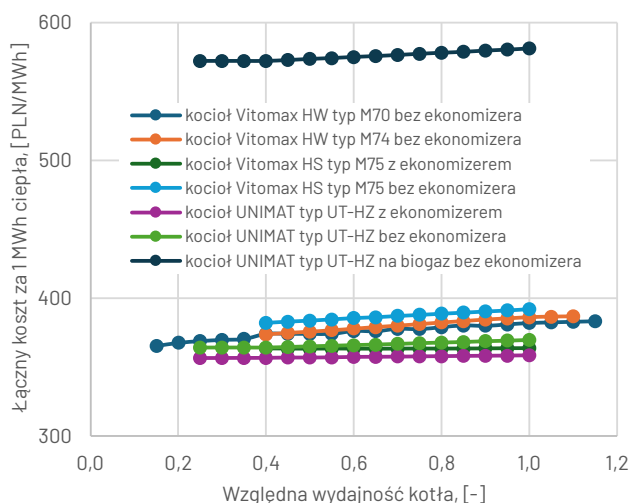
Obliczenia dla kotła gazowego Vitomax HW typ M70 również wykonano w dwóch wariantach – z uwzględnieniem i bez opłat za emisję, ponieważ moc znamionowa tego kotła wynosiła mniej niż 20 MW.

Widoczny jest wyraźny wpływ kosztu zakupu uprawnień do emisji CO₂ na ostateczny koszt pracy kotła gazowego – między 381,79 a 338,93 PLN/MWh. Uprawnienia do emisji CO₂ mogą zwiększyć koszt operacyjny nawet o 13%. Kotły gazowe charakteryzują się niskim wskaźnikiem emisji CO₂, zatem koszt zakupu uprawnień do emisji mniej wpływa na ostateczny koszt operacyjny niż dla kotłów węglowych.



Rys. 16. Łączny koszt operacyjny 1 MWh z kotła Vitomax HW typ M70 ciepła bez oraz z uwzględnieniem kosztów zakupu uprawnień do emisji CO₂. Źródło: opracowanie własne

Fig. 16. Total operating cost per 1 MWh of heat for the Vitomax HW type M70 boiler including and excluding the cost of purchasing CO₂ emission. Source: author's own study



Rys. 17. Łączny koszt operacyjny 1 MWh ciepła z analizowanych kotłów gazowych i biogazowych. Źródło: opracowanie własne

Fig. 17. Total operating cost per 1 MWh of heat for the analysed gas and biogas boilers. Source: author's own study

Analizie poddano kilka modeli kotła (rys. 17). Dla wszystkich analizowanych kotłów gazowych różnica pomiędzy największym i najmniejszym łącznym kosztem operacyjnym jest niewielka i wynosi maksymalnie 17,75 PLN/MWh. Wynika to z charakterystyk sprawności kotłów. W całym przedziale względnej wydajności w której mogą pracować, ich sprawność zmienia się maksymalnie o 5 p.p.

W przypadku zasilania biometanem nie uwzględniano kosztu zakupu uprawnień do emisji CO₂, ponieważ spalanie biogazu nie jest objęte Systemem Handlu Uprawnieniami do Emisji [7, 27]. Głównym kosztem operacyjnym jest koszt zakupu paliwa. Ceny nieoczyszczonego biogazu nie są wysokie, mogą wynosić ok. 17,91 PLN/GJ [8], jednakże jego oczyszczenie do biometanu zwiększa jego cenę nawet do 538 PLN/MWh [5], co jest większą wartością od średniej ceny gazu ziemnego na rynku (cena z raportu URE 3,05 PLN/m³ [8], uwzględniając wartość opałową gazu ziemnego z KO-BiZE za 2024 r., cena gazu ziemnego wynosiła 83,42 PLN/GJ lub

300,31 PLN/MWh). Koszt biometanu sprawia, że produkcja energii cieplnej z tego paliwa jest najdroższa z przedstawionych w tym rozdziale kotłów gazowych, mimo że nie uwzględnia się kosztu zakupu uprawnień do emisji CO₂.

Modele kotła, które były wyposażone w ekonomizery, mają najmniejsze łączne koszty wytwarzania energii cieplnej. Ekonomizery pozwalają na odzyskanie ciepła ze spalin kotłów, co podwyższa ich sprawność.

Za pomocą wykresów kosztów operacyjnych ciepłownie mogą przeprowadzić analizę, czy opłacalne będzie zakupienie droższego kotła z ekonomizyrem o niższym łącznym koszcie operacyjnym.

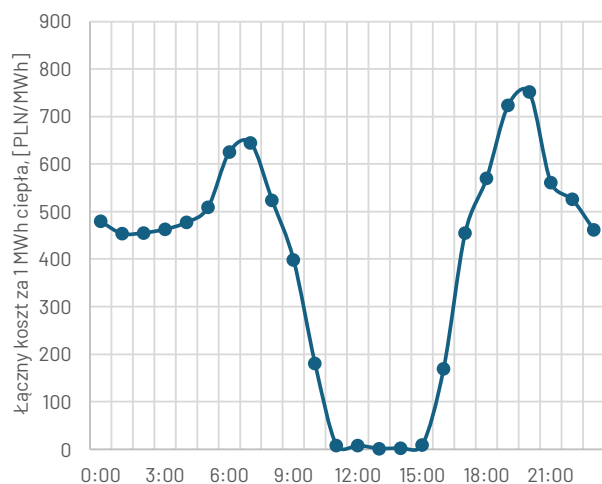
4.5. Kocioł elektryczny

Poddano również analizie kocioł wodny elektryczny firmy LO-OS Centrum Sp. z o.o. Jest to kocioł LOOS BOSCH ELHB. Według informacji od producenta kocioł ten ma sprawność znamionową w całym zakresie jego możliwej wydajności – jest to ogólna właściwość kotłów elektrodowych. Według informacji z karty katalogowej kotła ELHB, jego sprawność wynosi do 99,6% [12].

Wykonano dodatkową analizę zależności kosztów operacyjnych wytworzenia 1 MWh ciepła od zmiennej ceny energii elektrycznej w ciągu doby. Wybrano średnioważone ceny godzinowe energii elektrycznej z dnia 08.04.2026 r. z Rynku Dnia Następnego TGE [3]. Średnioważone ceny godzinowe energii elektrycznej przedstawiono w tabeli poniżej.

Tabela 2. Średnioważone ceny godzinowe energii elektrycznej [3]
Table 2. Average of weighted hourly electricity prices [3]

Godzina	Średnioważona cena godzinowa energii elektrycznej [PLN/MWh]
00:00	468,13
01:00	443,16
02:00	444,75
03:00	452,08
04:00	466,35
05:00	496,60
06:00	610,92
07:00	629,78
08:00	511,48
09:00	388,95
10:00	176,00
11:00	7,96
12:00	7,74
13:00	1,47
14:00	2,58
15:00	8,17
16:00	165,71
17:00	443,86
18:00	556,36
19:00	706,39
20:00	733,68
21:00	548,18
22:00	513,51
23:00	451,32



Rys. 18. Łączny koszt operacyjny 1 MWh ciepła w danej godzinie doby z kotła LOOS BOSCH typ ELH.
Źródło: opracowanie własne

Fig. 18. Total operating cost per 1 MWh of heat over 24-hour period for the LOOS BOSCH type ELHB boiler.
Source: author's own study

Kocioł zasilany energią elektryczną nie emituje bezpośrednio CO₂, zatem nie ponosi się kosztów za korzystanie ze środowiska oraz kosztów zakupu uprawnień do emisji CO₂. Opłaty te są zawarte w cenie energii elektrycznej kupowanej z sieci elektroenergetycznej.

Przyjmując do obliczeń zmienne ceny energii elektrycznej różnica między największym i najmniejszym kosztem operacyjnym wynosi 721,58 PLN/MWh. Na podstawie obliczonych kosztów operacyjnych, uruchamianie analizowanego kotła byłoby opłacalne tylko w godzinach od 10:00 do godziny 16:00, ponieważ ceny wyprodukowania 1 MWh były niższe niż dla wcześniej przedstawionych kotłów. Mogłoby się zdarzyć, że w innym dniu nie byłoby żadnej godziny, w której opłacalne byłoby uruchomienie kotła.

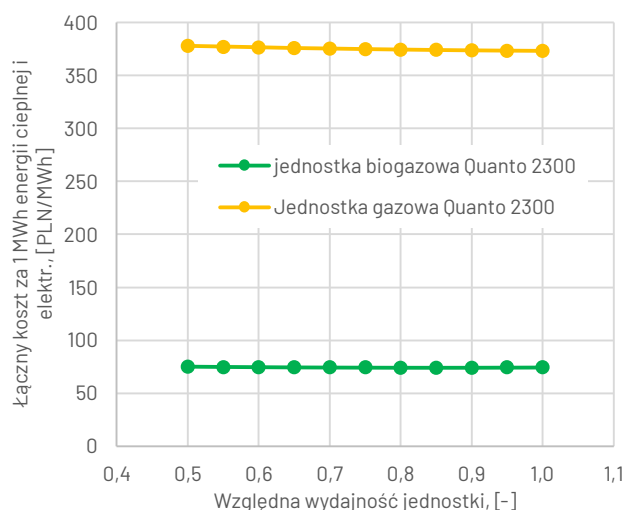
Ze względu na zmienne ceny energii elektrycznej oraz jej wysoką średnią cenę, kotły zasilane energią elektryczną nie powinny być stosowane jako podstawowe źródło ciepła sieciowego. Dobrym zastosowaniem takich kotłów jest wykorzystywanie okresów z bardzo niskimi cenami energii do wytwarzania taniego ciepła. Jeśli duża ilość ciepła nie jest potrzebna w okresach niskich cen energii elektrycznej, to można ją magazynować i wykorzystywać w okresach większego zapotrzebowania.

4.6. Gazowy układ kogeneracyjny

Analizowano kogenerator gazowy zasilany gazem ziemnym i biogazem. Jednostki biogazowe nie są objęte Systemem Handlu Uprawnieniami do Emisji niezależnie od mocy znamionowej [7, 27], zatem w analizie nie uwzględniano kosztu zakupu uprawnień do emisji CO₂.

Dla analizowanych jednostek gazowych i biogazowych Quanto różnica pomiędzy największym i najmniejszym łącznym kosztem operacyjnym jest niewielka i wynosi maksymalnie 3,52 PLN/MWh (jednostka na gaz ziemny). Wynika to z charak-

terystyk sprawności całkowitej jednostek. W całym przedziale wydajności względnej, w której mogą pracować, ich sprawność całkowita zmienia się maksymalnie o 1 p.p. Zatem wpływ zmiennej charakterystyki sprawności analizowanych jednostek na łączny koszt eksploatacyjny jest niewielki. Większa różnica występuje dla dużej jednostki gazowo-parowej i wynosi 103,98 PLN/MWh. Jednostka ta ma większy zakres pracy i dla minimalnej względnej wydajności 30% sprawność całkowita wynosi 71,74%, co przekłada się na zwiększony łączny koszt operacyjny 473,07 PLN/MWh.



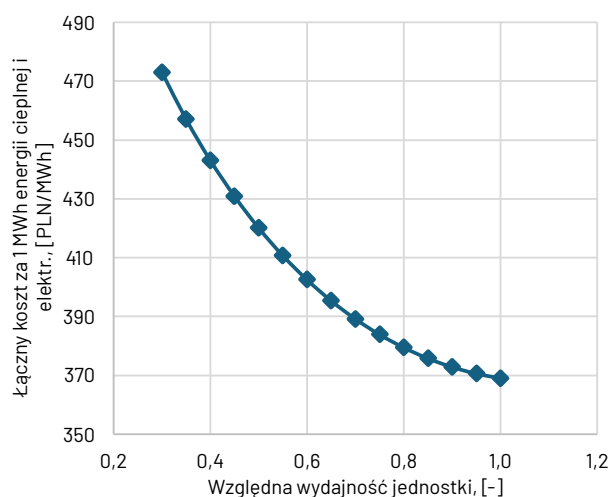
Rys. 19. Łączny koszt operacyjny 1 MWh ciepła i energii elektr. w zależności od względnej wydajności jednostki biogazowej Quanto 2300 i gazowej Quanto 2300. Źródło: opracowanie własne

Fig. 19. Total operating cost per 1 MWh of heat and electrical energy for gas and biogas CHP units depending on the relative output. Source: authors' own study

Zmiana paliwa wpływa na łączny koszt operacyjny analizowanej jednostki. Sprawności całkowite jednostki zasilanej gazem są większe niż dla biogazu, ale jednostka biogazowa nie ponosi kosztu zakupu uprawnień do emisji CO₂ oraz cena paliwa biogazowego jest znacznie niższa. Średnia cena biogazu w 2024 r. [8] wynosiła 17,91 PLN/GJ, a gazu ziemnego wysokometanowego wynosiła 3,05 PLN/m³ [8]. Uwzględniając wartość opałową gazu ziemnego z KOBiZE za 2024 r., cena gazu ziemnego wynosiła 83,42 PLN/GJ. Te czynniki sprawiły, że koszt pracy jednostki Quanto 2300 na gaz ziemny jest 502% większy niż jednostki na biogaz.

4.7. Gazowo-parowy układ kogeneracyjny

Dla jednostki gazowo-parowej różnica między najwyższym i najniższym kosztem wytworzenia 1MWh wynosi 103,98 PLN/MWh. Jednostka ta ma większy zakres pracy i dla minimalnej względnej wydajności 30 % sprawność całkowita wynosi 71,74 %, co przekłada się na zwiększony łączny koszt operacyjny 473,07 PLN/MWh. W przypadku dużej jednostki gazowo-parowej zmienna charakterystyka sprawności całkowitej ma znaczny wpływ na końcowy koszt operacyjny.



Rys. 20. Łączny koszt operacyjny 1 MWh ciepła i energii elektr. w zależności od względnej wydajności jednostki gazowo-parowej z elektrociepłowni Vuosaari B.

Źródło: opracowanie własne

Fig. 20. Total operating cost per 1 MWh of heat and electrical energy for the combined-cycle unit in power plant Vuosaari B.

Source: author's own study

5. Wnioski

Przeprowadzenie analizy kosztów operacyjnych źródeł ciepła w zależności od ich względnej wydajności pokazało, że każde źródło reagowało inaczej na zmieniającą się wydajność. Różnica między największym a najmniejszym łącznym kosztem operacyjnym wyniosła od 0,72 PLN/MWh (jednostka biogazowa) do nawet 103,98 PLN/MWh (jednostka gazowo-parowa). Różnica ta zależy głównie od charakterystyki sprawności danego źródła. W punkcie pracy o najwyższej sprawności łączny koszt operacyjny był najmniejszy. Sprawia to, że w niektórych kotłach najbardziej opłacalna praca nie będzie w ich znamionowej wydajności.

Na wielkość różnicy pomiędzy największym i najmniejszym łącznym kosztem operacyjnym danego źródła mają wpływ głównie cena paliwa oraz wielkość emisji i koszt zakupu uprawnień do emisji CO₂.

Podobne analizy kosztów operacyjnych źródeł ciepła mogą być przydatne w przedsiębiorstwach ciepłowniczych do określania, które z dostępnych źródeł powinno być uruchomione w zależności od danego zapotrzebowania na ciepło w sieci ciepłowniczej. Kolejnym zastosowaniem może być proces zakupu nowego źródła i wybór, który kocioł/ jednostka kogeneracyjna będzie tańsza w eksploatacji. Można wtedy dopasować dane źródło do rocznego profilu zapotrzebowania na ciepło z danych historycznych ciepłowni.

Znając tylko znamionową sprawność wytwarzania energii cieplnej, można błędnie ocenić średni łączny koszt operacyjny, ponieważ w zakładzie ciepłowniczym wybrana jednostka mogłaby przykładowo pracować średnio ze względną wydajnością 80%, co mogłoby zwiększyć lub też zmniejszyć jego średni łączny koszt operacyjny tak, jak było to przedstawione w wykonanej analizie.

Dodatkowo przeprowadzona analiza pokazuje jak duży wpływ na koszty operacyjne źródeł ciepła ma cena stosowanego paliwa. Wysoka cena gazu ziemnego powoduje, że pomimo wysokiej sprawności kotłów gazowych i niskiego wskaźnika emisji CO₂, jego

łączny koszt operacyjny może być ponad dwa razy większy niż kotła zasilanego węglem kamiennym. Wpływ ceny paliwa widoczny był również w przypadku, gdy ten sam kocioł zasilany mógł być gazem ziemnym lub biometanem. Charakterystyka sprawności kotła się nie zmieniała, ale przez wysoką cenę biometanu łączny koszt pracy kotła na tym paliwie był ok. 1,5 razy większy od pracy kotła na gazie ziemnym.

Wpływ ceny energii elektrycznej zasilającej dane źródło ciepła na łączny koszt operacyjny był znaczący tylko w wypadku kotła zasilanego energią elektryczną. Cena energii elektrycznej na giełdzie może się drastycznie zmieniać – może być najdroższym źródłem zasilania w godzinach szczytowego zapotrzebowania na energię elektryczną, ale też może osiągać wartości bliskie 0 PLN/MWh. Takie wahania ceny energii elektrycznej powodowały, że przedstawiony kocioł elektrodowy mógł być najdroższym z analizowanych źródeł ciepła, z łącznym kosztem operacyjnym 751,02 PLN/MWh lub najtańszym z łącznym kosztem operacyjnym 1,51 PLN/MWh.

Na podstawie uzyskanych wyników wykazano różny wpływ kosztu zakupu uprawnień do emisji CO₂ w zależności od wykorzystywanego paliwa. Kotły na biomasę, biogaz oraz energię elektryczną nie ponoszą tego kosztu. Największy wpływ kosztu zakupu uprawnień do emisji CO₂ na całkowity koszt operacyjny źródła ciepła ustalono w przypadku kotłów zasilanych węglem kamiennym. Węgiel kamienny ma wysoki wskaźnik emisji, przez co koszt zakupu uprawnień do emisji stanowił prawie 40% całego kosztu operacyjnego. W przypadku kotłów zasilanych gazem ziemnym oraz jednostek kogeneracyjnych zasilanych gazem ziemnym udział kosztu zakupu uprawnień do emisji CO₂ wynosił ok. 11%. Biomasa, np. drewno opałowe, również posiada wysoki wskaźnik emisji CO₂ (nawet wyższy niż węgiel kamienny), jednakże jest ona traktowana jako Odnawialne Źródło Energii, przez co emisje ze spalania tego paliwa nie są objęte Systemem Handlu Uprawnieniami do Emisji.

Z przeprowadzonej analizy wpływu udziału biomasy we współspalaniu z węglem kamiennym na koszt operacyjny kotła zauważono, że dodając biomasę do kotła węglowego, można obniżyć koszty związane z zakupem uprawnień do emisji CO₂. Dodanie biomasy powodowało obniżenie sprawności kotła, przez co spalana była większa ilość paliwa, jednak oszczędność kosztów związanych z zakupem uprawnień do emisji była większa niż wzrost kosztu zakupu większej ilości paliwa. Ważne jest dobranie odpowiedniego udziału biomasy w spalonym paliwie, by łączne koszty eksploatacyjne były jak najmniejsze.

6. Literatura

- [1] Ciuła, J., Generowicz, A., Gaska, K., & Gronba-Chyła, A. (2022). Efficiency Analysis of the Generation of Energy in a Biogas CHP System and its Management in a Waste Landfill – Case Study. *Journal of Ecological Engineering*, 23(7), 143–156. <https://doi.org/10.12911/22998993/149609>
- [2] Czarnecki, P. (2026). *Analiza porównawcza kosztów eksploatacji różnych źródeł ciepła* [Praca magisterska], Politechnika Warszawska
- [3] Towarowa Giełda Energii. (2026). Dane statystyczne. <https://www.tge.pl/dane-statystyczne> (dostęp: 03.05.2026)
- [4] Dane dotyczące ceny uprawnień do emisji CO₂ w 2024 r., strona internetowa energy instrat, <https://energy.instrat.pl/ceny/eu-ets> (dostęp 03.05.2026)

- [5] Ministerstwo Klimatu i Środowiska. (2026). *Ogłoszenie rozporządzenia Ministra Klimatu i Środowiska w sprawie ceny referencyjnej dla biometanu* <https://www.gov.pl/web/klimat/ogloszenie-rozporzadzenia-ministra-klimatu-i-srodowiska-w-sprawie-ceny-referencyjnej-dla-bio-metanu> (dostęp: 03.05.2026)
- [6] Narodowy Bank Polski. (2026). Archiwum kursów – tabela A. <https://nbp.pl/statystyka-i-sprawozdawczosc/kursy/archiwum-tabela-a-csv-xls> (dostęp: 03.05.2026)
- [7] Krajowy Ośrodek Bilansowania i Zarządzania Emisjami. (2021). Wartości opałowe (WO) i wskaźniki emisji CO₂ (WE) w roku 2021 do raportowania w ramach Systemu Handlu Uprawnieniami do Emisji. <https://www.kobize.pl/pl/article/monitorowanie-raportowanie-weryfikacja-emisji/id/318/tabele-wo-i-we> (dostęp: 03.05.2026)
- [8] Urząd Regulacji Energetyki. (2025). Energetyka ciepła w liczbach 2024. <https://www.ure.gov.pl/pl/cieplo/energetyka-ciepna-w-l> (dostęp: 03.05.2026)
- [9] Obwieszczenie Ministra Klimatu i Środowiska z dnia 4 sierpnia 2023 r. w sprawie wysokości stawek opłat za korzystanie ze środowiska na rok 2024 (M.P. 2023, poz. 914).
- [10] SEFAKO S.A. (b.d.). Kotły KBs – dane techniczne. <https://sefako.pl/oferta/produkcja-kotlow-i-elementow-kotlowych,217/kbs> (dostęp: 03.05.2026)
- [11] Viessmann Sp. z o.o. (b.d.). *Dane techniczne kotłów – karty katalogowe*. <https://vibooks.viessmann-climatesolutions.com/pl/pl> (dostęp: 03.05.2026)
- [12] LOOS Centrum Sp. z o.o. (b.d.). Dane techniczne kotłów [Karty katalogowe producenta]
- [13] TEDOM Poland Sp. z o.o. (b.d.). Dane techniczne jednostek kogeneracyjnych [Karty katalogowe producenta]
- [14] SEFAKO S.A. (b.d.). Dane techniczne kotłów na węgiel kamienny WR oraz kotła biomasowego KBs [Charakterystyki sprawności kotłów przekazane przez producenta]
- [15] Ministerstwo Klimatu i Środowiska. (2025). Darmowe uprawnienia do emisji CO₂ dla ciepłownictwa <https://www.gov.pl/web/klimat/darmowe-uprawnienia-do-emisji-co2-dla-cieplownictwa2> (dostęp: 03.05.2026)
- [16] CIRE. (b.d.). Darmowe uprawnienia do emisji CO₂ dla ciepłownictwa. <https://www.cire.pl/artykuly/serwis-informacyjny-cire-24/darmowe-uprawnienia-do-emisji-co2-dla-cieplownictwa> (dostęp: 03.05.2026)
- [17] Gałek, R., Gil, P., Szewczyk, M., & Wolańczyk, F. (2018). Efficiency of micro combined heat and power unit in real conditions. *Zeszyty Naukowe Politechniki Rzeszowskiej. Mechanika*, 35(90), 453–463. <https://doi.org/10.7862/rm.2018.39>
- [18] Gładysz P., Świerzewski M., (2017). Environmental and economic assessment of a biomass-based cogeneration plant: Polish case study. *MAZOWSZE Studia Regionalne*, (22), 97–114. <https://doi.org/10.21858/msr.22.07>
- [19] Srinivas, G. T., Kumar, D. R., Mohan, P. V. V. M., & Rao, B. N. (2017). Efficiency of a coal fired boiler in a typical thermal power plant. *American Journal of Mechanical and Industrial Engineering*, 2(1), 32–36. <https://doi.org/10.11648/j.ajmie.20170201.15>
- [20] Hopkins, S. D. (2013). *Modeling and multi-objective optimization of the Helsinki district heating system and establishing the basis for modeling the Finnish power network* (Doctoral dissertation, Virginia Tech).
- [21] Krajowy Ośrodek Bilansowania i Zarządzania Emisjami. (b.d.). Informacja ogólna dotycząca monitorowania, raportowania i weryfikacji emisji <https://www.kobize.pl/pl/article/monitorowanie-raportowanie-weryfikacja-emisji/id/317/informacja-ogolna> (dostęp: 03.05.2026)
- [22] Kehlhofer, R., Rukes, B., Hannemann, F., & Stirnimann, F. (2009). *Combined-cycle gas & steam turbine power plants* (3rd ed.). PennWell.
- [23] Mikulandric, R., Krajačić, G., Duić, N., Khavin, G., Lund, H., & Mathiesen, B. V. (2015). Performance Analysis of a Hybrid District Heating System: a Case Study of a Small Town in Croatia. *Journal of Sustainable Development of Energy Water and Environment Systems*, 3(3), 282–302. <https://doi.org/10.13044/j.sdwes.2015.03.0022>
- [24] Nowak, K., & Rabczak, S. (2021). Co-Combustion of Biomass with Coal in Grate Water Boilers at Low Load Boiler Operation. *Energies*, 14(9), 2520. <https://doi.org/10.3390/en14092520>
- [25] Nussbaumer, T., Thalmann, S., Jenni, A., & Ködel, J. (2020). *Handbook on planning of district heating networks*. QM Fernwärme and EnergieSchweiz.
- [26] Obwieszczenie Marszałka Sejmu Rzeczypospolitej Polskiej z dnia 22 maja 2025 r. w sprawie ogłoszenia jednolitego tekstu ustawy o efektywności energetycznej (Dz.U. 2025 poz. 711)
- [27] Obwieszczenie Marszałka Sejmu Rzeczypospolitej Polskiej z dnia 7 listopada 2025 r. w sprawie ogłoszenia jednolitego tekstu ustawy o systemie handlu uprawnieniami do emisji gazów cieplarnianych (Dz.U. 2025 poz. 1685)
- [28] Pajak, S. (2014). Parametry eksploatacyjne układów kogeneracyjnych opartych na silnikach gazowych—Deklaracje a rzeczywistość. *Nowa Energia*, (2-3/2014).
- [29] Krajowy Ośrodek Bilansowania i Zarządzania Emisjami. (2014). Przydziały uprawnień – instalacje. Informacja ogólna <https://www.kobize.pl/pl/article/przydzialy-uprawnien-instalacje/id/353/informacja-ogolna> (dostęp: 03.05.2026)
- [30] Suntoro, D., Sinaga, P., Yudianto, R. C., & Faridha. (2022). Energy efficiency and energy saving potential analysis of biomass boiler at the PT Greenfields Indonesia Milk Processing Plant. *IOP Conference Series Earth and Environmental Science*, 1034(1), 012012. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1034/1/012012>
- [31] Szałucki, K. (b.d.). Metodyka obliczeń opłacalności zastosowania systemu odzysku ciepła zawartego w odsolinach odprowadzanych z kotła parowego. *Systemy Pary i Kondensatu*. https://www.szalucki.pl/2014/ARTYKULY/Odzysk_ciepła_odsolin.pdf (dostęp: 03.05.2026)
- [32] Tic, W. J., & Guziałowska-Tic, J. (2021). The Cost-Efficiency Analysis of a system for improving Fine-Coal combustion efficiency of power plant boilers. *Energies*, 14(14), 4295. <https://doi.org/10.3390/en14144295>
- [33] Ustawa z dnia 20 maja 2016 r. o efektywności energetycznej (Dz.U. 2016 poz. 831)

Wpływ powodzi na funkcjonowanie miejskiej oczyszczalni ścieków w Paczkowie

The impact of flooding on the performance of the municipal wastewater treatment plant in Paczków

Adam Rak^{1*} , Sandra Tetlak-Kurowska², Artur Rolka³, Dominik Rak⁴

¹ Wydział Budownictwa i Architektury, Politechnika Opolska

² Zakład Wodociągów i Kanalizacji w Paczkowie

³ Burmistrz Gminy Paczków

⁴ Ekocentrum Sp. z o.o. Wrocław

* Kontakt / Correspondence: a.rak@po.edu.pl

Streszczenie:

Artykuł przedstawia analizę wpływu powodzi z września 2024 r. na funkcjonowanie Miejskiej Oczyszczalni Ścieków w Paczkowie oraz ocenę skuteczności działań podjętych w celu przywrócenia ciągłości oczyszczania ścieków. Przedstawiono zakres zniszczeń infrastruktury technologicznej i awaryjny tryb pracy oczyszczalni. Analiza wyników eksploatacyjnych wykazała, że rozwiązanie to umożliwiło stabilizację procesu oczyszczania i osiągnięcie parametrów zgodnych z obowiązującym pozwoleniem wodnoprawnym. Przedstawiono rekomendacje projektowania infrastruktury wodno-kanalizacyjnej odpornej na skutki zmian klimatu i ekstremalnych zjawisk powodziowych.

Słowa kluczowe: powódź, oczyszczanie ścieków, oczyszczalnia ścieków, SBR, retencja

Abstract:

This paper presents an analysis of the impact of the September 2024 flood on the operation of the Municipal Wastewater Treatment Plant in Paczków and evaluates the effectiveness of the measures implemented to restore the continuity of wastewater treatment. The extent of damage to the technological infrastructure and the emergency operation mode are described. An analysis of operational performance data demonstrated that the temporary configuration successfully stabilized the treatment process and enabled the treated wastewater to comply with the discharge standards of the water permit. The paper also provides recommendations for the design of water and wastewater infrastructure resilient to the impacts of climate change and extreme flood events.

Keywords: flood, wastewater treatment, wastewater treatment plant, SBR, retention

1. Wprowadzenie

Celem pracy jest ocena wpływu powodzi z września 2024 r. na funkcjonowanie Miejskiej Oczyszczalni Ścieków w Paczkowie oraz ocena skuteczności zastosowanych rozwiązań technologicznych umożliwiających utrzymanie ciągłości oczyszczania ścieków w okresie odbudowy obiektu.

Powódź w 2024 roku została wywołana przez tzw. „niż geneueński – Borys” o dość specyficznym charakterze – na Dolnym Śląsku – którym był obszarem najbardziej dotkniętym. Opady w Sudetach były bardzo wysokie (ale generalnie niższe niż w 1997 roku). Największe wartości odnotowano w zlewni Nysy Kłodzkiej i Bobru [12]. Sytuacja w Kotlinie Kłodzkiej była mniej korzystna. Po awarii zapory

w Stroniu Śląskim oraz przelewu bocznego zbiornika Topola, konsekwencje tej sytuacji były katastrofalne praktycznie na całej długości Nysy Kłodzkiej – aż do ujścia do Odry. Miejska Oczyszczalnia Ścieków (MOŚ) w Paczkowie zlokalizowana jest przy ulicy Moniuszki 17 w północno-wschodniej części m. Paczkowa. Od strony północnej położenie jej ogranicza rzeka Nysa Kłodzka, od strony południa Potok Młynówka. Odbiornikiem oczyszczonych na urządzeniach mechaniczno-biologicznej oczyszczalni ścieków typu APIS jest rzeka Nysa Kłodzka. Tym samym MOŚ została narażona na oddziaływanie fali powodziowej. Ostatni pomiar ścieków oczyszczonych w wysokości 1495 m³ zanotowano 14.09.2024 r. o godz. 22.00 [1]. Zalanie oczyszczalni falą powodziową nastąpiło 15.09.2024 r. o godz. 06.00 (rys. 1) pierwszą falą powodziową o wysokości ca 1,2–1,4 m licząc

od poziomu terenu oczyszczalni. Druga fala o krótszym cyklu była nieco wyższa, osiągając ca 2,0 m. Po przejściu fali powodziowej służby ZWIK podjęły działania ratownicze i umożliwiające awaryjne uruchomienie niektórych urządzeń (18–23.09), w tym montaż tymczasowej pompowni zasilanej z agregatu prądotwórczego w celu przepompowywania ścieków z pompowni I stopnia bezpośrednio do rzeki Nysy Kłodzkiej. W dniu 09.10.2024 r. uruchomiono system odwozu ścieków do kolektora ścieków w Otmuchowie lub do oczyszczalni w Nysie. Przygotowano laguny jako zbiornik przejściowy do poboru ścieków przez beczkowozy. W tym czasie podjęto także prace porządkowe na obiekcie (usunięcie drzew, namułu itp.), dezynfekcję pomieszczeń socjalnych, tymczasową naprawę drogi dojazdowej oraz częściowe odpompowanie ścieków z zalanych obiektów – komór osadnika wtórnego, zbiornika osadu nadmiernego, komory żelbetowej w części separacji, zbiornika retencyjnego, zbiornika bioreaktora.



Rys. 1. Widok na zalaną Miejską Oczyszczalnię Ścieków w Paczkowie (ZWIK Paczków)

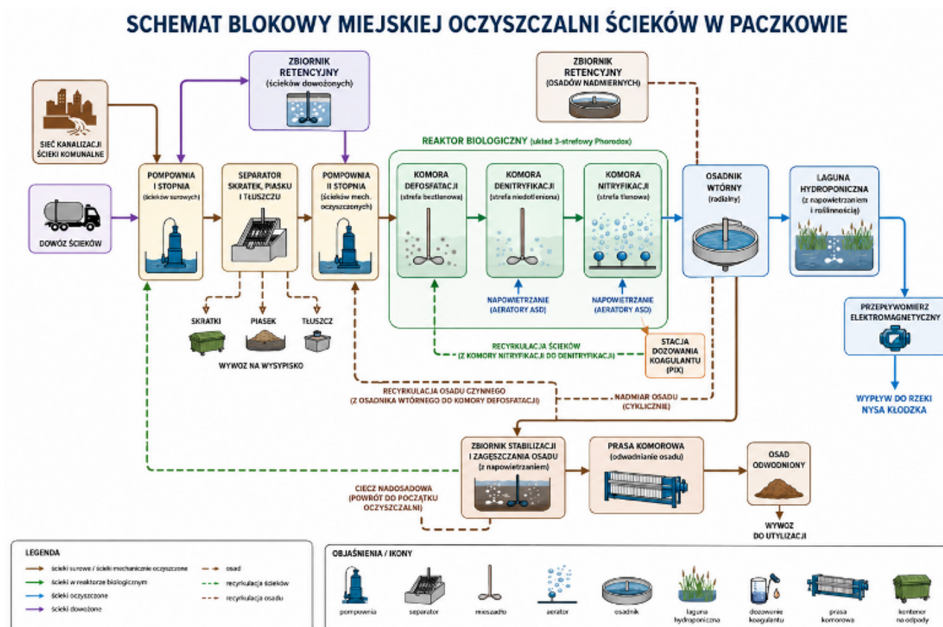
Fig. 1. Flooded Municipal Sewage Treatment Plant in Paczków (ZWIK Paczków)

Przeprowadzona inwentaryzacja [1] wykazała znaczne zniszczenia i uszkodzenia. Całkowitemu zniszczeniu uległ ciąg technologiczny, aparatura kontrolno-pomiarowa, sterowania i automatyki. Uszkodzeniu uległy maszyny i urządzenia ciągu technologicznego (agregaty prądotwórcze, dmuchawy, sprężarki, panele) z wyjątkiem pomp na pompowni I i II stopnia. Stan konstrukcji zbiornika bioreaktora, osadnika wtórnego, zbiornika osadu nadmiernego oceniono jako zły, wręcz awaryjny.

2. Charakterystyka oczyszczalni w Paczkowie

MOŚ zaprojektowana na 22 396 RLM została wybudowana w 1999 roku. Maksymalne hydrauliczne obciążenie oczyszczalni wynosi 2 500 m³/d, jednak w rzeczywistości obiekt przyjmuje dziennie około 1 350 m³ ścieków. Oczyszczalnia jest zbudowana na planie koła, a wszystkie urządzenia ciągu technologicznego umieszczono we wnętrzu budynku. Jest to istotne z punktu widzenia oszczędności przestrzeni oraz ograniczania negatywnego wpływu obiektu na otoczenie. Dzięki zadaszeniu zminimalizowane są uciążliwości zapachowe związane z procesem oczyszczania [2, 16]. O zastosowaniu wymagającej technologii o wysokiej efektywności zadecydowało pozwolenie wodnoprawne wydane z 13 marca 2020 r. [9], które określiło wymagania dla ścieków oczyszczonych odprowadzanych do rzeki Nysa Kłodzka. Najwyższe dopuszczalne wartości określono odpowiednio: zawiesina 35 mg/dm³, ChZT_{cr} 125 mg/dm³, BZT₅ 25 mgO₂/dm³, azot ogólny 30 mg/dm³, fosfor ogólny 2 mg/dm³ i węglowodory ropopochodne 15 mg/dm³.

Technologia oczyszczania ścieków oparta jest na osadzie czynnym [7], natomiast jako trzeci stopień oczyszczania wykorzystano reaktor biologiczno-hydrauliczny w postaci laguny hydroponicznej (rys. 2, 3) o pojemność czynnej 530 m³ [2]. Dzięki obudowie w otoczeniu laguny panują warunki szklarniowe, gdzie temperatura dochodzi do 40°C, a wilgotność nawet do 90%. Intensyfikuje to procesy samooczyszczania.



Rys. 2. Schemat technologiczny Miejskiej Oczyszczalni Ścieków w Paczkowie (ZWIK Paczków)

Fig. 2. Technological diagram of the Municipal Sewage Treatment Plant in Paczków (ZWIK Paczków)

Przed powodzią zastosowane rozwiązania skutecznie ograniczały stężenia zawiesiny, materii organicznej oraz biogenów, poprawiały stabilność jakości ścieków odpływowych z wykorzystaniem naturalnych procesów biologicznych przy relatywnie niskich nakładach energetycznych [3, 4, 6, 8, 15].



Rys. 3. Laguna hydroponiczna (ZWIK Paczków)
Fig. 3. Hydroponic lagoon (ZWIK Paczków)

3. Analiza efektywności oczyszczania ścieków

3.1. Metodyka badań

Badania przeprowadzono w oparciu o analizę funkcjonowania Miejskiej Oczyszczalni Ścieków w Paczkowie w trzech okresach eksploatacyjnych: przed powodzią (do 09.2024), w okresie pracy awaryjnej po powodzi (09.2024–11.2025) oraz po uruchomieniu tymczasowego układu technologicznego z reaktorem SBR (11.2025 r. do 06.2026). Podstawę analiz stanowiły dokumentacja techniczna i eksploatacyjna oczyszczalni, wyniki monitoringu jakości ścieków surowych i oczyszczonych prowadzonego przez Zakład Wodociągów i Kanalizacji w Paczkowie, wyniki badań laboratoryjnych wykonywanych zgodnie z obowiązującymi metodami referencyjnymi oraz dokumentacja dotycząca uszkodzeń powodziowych oraz procesu odbudowy oczyszczalni. Analizie poddano podstawowe wskaźniki jakości ścieków: BZT₅, ChZT, zawiesinę ogólną, azot ogólny oraz fosfor ogólny, porównując wartości uzyskane w poszczególnych etapach funkcjonowania oczyszczalni z wymaganiami obowiązujących pozwoleń wodnoprawnych.

Ocenę skuteczności zastosowanych rozwiązań technologicznych przeprowadzono na podstawie zmian efektywności usuwania zanieczyszczeń oraz stabilności pracy układu technologicznego w warunkach zmiennego obciążenia hydraulicznego, charakterystycznego dla kanalizacji ogólnospławnej. W analizie wykorzystano metodę porównawczą, zestawiając parametry pracy oczyszczalni przed powodzią, w okresie funkcjonowania awaryjnego oraz po wdrożeniu tymczasowej technologii oczyszczania opartej na reaktorze SBR, lagunie hydroponicznej i systemie ozonowania ścieków. Uzyskane wyniki odniesiono do danych literaturowych dotyczących oczyszczalni wykorzystujących technologię osadu czynnego, laguny hydroponiczne oraz procesy ozonowania ścieków.

3.2. Okres do powodzi (do 09.2024)

Przeprowadzone analizy w latach 2009–2011 wykazały, że realizowanie procesu oczyszczania ścieków w oczyszczalni wzbo-gaconej o trzeci stopień oczyszczania ścieków w postaci laguny hydroponicznej, pozwala na skuteczne zmniejszenie stężeń zanieczyszczeń w ściekach [3]. Skuteczność usuwania związków organicznych wyrażona w BZT₅ i ChZT przekraczała wymagane pozwoleniem wodnoprawnym 90%, co umożliwiło uzyskanie na odpływie wartości BZT₅ poniżej 4,8 mgO₂/dm³, a ChZT w grani-cach 24,2–33,0 mgO₂/dm³. Efekty usuwania związków biogen-nych były wysokie dzięki zastosowaniu oczyszczania biologicz-nego wspomaganego dawkowaniem koagulantu, efektem czego odprowadzano nie więcej niż 0,3 mgP/dm³ fosforu ogólnego i 20,4 mgN/dm³ ogólnego azotu. Na odpływie uzyskano wartości zawie-siny mniejsze niż 3,4 mg/dm³ i w 100% spełniono konieczność za-pewnienia minimum 90,0% skuteczności oczyszczania (tabela 1).

Tabela 1. Średnia roczna sprawność oczyszczalni w latach 2009–2011 (ZWIK Paczków, [3])

Table 1. Average annual efficiency of the wastewater treatment plant in 2009–2011 (ZWIK Paczków, [3])

Rok	BZT5	ChZT	Azot ogólny	Fosfor ogólny	Zawiesina ogólna
2009	98,8	97,3	77,0	98,5	98,4
2010	98,0	94,8	98,1	95,1	98,5
2011	98,7	95,6	90,8	98,1	99,0

3.3. Okres po powodzi – praca w trybie awaryjnym

Mając na uwadze zakres zniszczeń powodziowych, stan tech-niczny urządzeń nadających się do dalszej eksploatacji, położenie względem odbiornika (narażenie na zalewanie) i koszty remontu podjęto decyzję o wybudowaniu praktycznie nowej oczyszczalni. W istniejącym obiekcie uruchomiono awaryjny układ technolo-giczny oparty na następujących procesach (rys. 4).

I faza: Ścieki z kanalizacji miejskiej doprowadzane są do pom-powni ścieków surowych, a ścieki dowożone gromadzone są w napowietrzanym zbiorniku retencyjnym i cyklicznie odprowa-dzane do pompowni ścieków surowych. Z pompowni ścieki tłó-czone są do separatora skrutek, piasku i tłuszczu, skąd dopływają do pompowni II stopnia.

II faza: Ścieki pompowane są do laguny hydroponicznej, w któ-rej dozuje się wodę ozonową. Okresowo konieczne jest usuwanie osadu nadmiernego z laguny. Nadmiar osadu odprowadzany jest do napowietrzanego zbiornika stabilizacji i zagęszczania. Ciecz nadosadowa odprowadzana jest na początek układu oczyszczania ścieków, a osad poddawany jest procesowi mechanicznego odwadniania.

W trybie awaryjnej pracy laguna została przygotowana do na-powietrzania ścieków (pierwsza strefa) oraz do kontaktu z wodą ozonową (druga strefa). Zastosowano kontenerowy ozonator za-pewniający wyjściowy poziom ozonu w wodzie 0,5–1,0 mg/dm³. W przypadku ścieków ozonowanie dezaktywuje części bakterii obecnych w ściekach i ogranicza powstawanie nieprzyjemnych.



Rys. 4. Schemat technologiczny oczyszczania ścieków w trybie awaryjnym (ZWIK Paczków)
Fig. 4. Technological diagram of wastewater treatment in emergency mode (ZWIK Paczków)

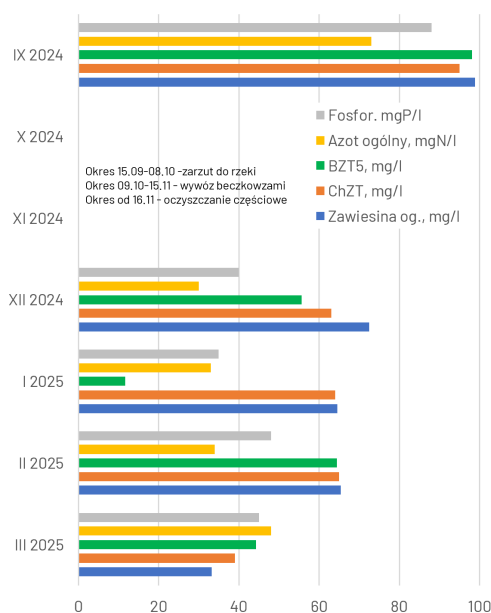
Działanie ozonu podczas oczyszczania ścieków zapewnia dezynfekcję, wspomaganie flokulacji, utlenianie zawiesiny koloidalnej związków organicznych (efektem odbarwianie) oraz redukcja zawartości związków organicznych oraz utlenianie śladowych ilości związków organicznych (w tym zanieczyszczeń odpowiedzialnych za smak, zapach, fenoli, pestycydów) [14]. Ozonowanie 100% ścieków przed zrzutem do rzeki zapewnia zwiększenie zawartości tlenu rozpuszczonego w rzece i chroni przed deficytami tlenu w bezpośrednim sąsiedztwie zrztu.

W dniu 18.02.2025 r. uzyskano nowe Pozwolenie wodnoprawne [10, 11], które znacznie złagodziło wymagania dla ścieków oczyszczonych odprowadzanych do rzeki Nysa Kłodzka dla zmniejszonej RLM 7 351 i Q_{SRD} 2 500 m³/d. Najwyższe dopusz-

czalne wartości określono odpowiednio: zawiesina 35mg/dm³, ChZT_{Cr} 125 mg/dm³ i BZT₅ 25 mgO₂/dm³. Nie określono wartości dopuszczalnych dla azotu ogólnego, fosforu ogólnego i węglowodorów. Przeprowadzone analizy danych z okresu od uruchomienia awaryjnego ciągu technologicznego do 03.2025 wykazały, że proces oczyszczania ścieków był znacznie uzależniony od jakości ścieków dopływających z kanalizacji ogólnospławnej (tab. 2, rys. 5). Wielkość redukcji usuwania związków organicznych wyrażona w BZT₅ i ChZT była zróżnicowana w wynosiła odpowiednio: zawiesiny od 65,4 do 33,2 mg/dm³; ChZT od 70,2 do 38,4 mg/dm³; BZT₅ od 64, 4 do 11,7 mgO₂/dm³. Z powyższych danych wynika, że w wskaźnikach zawiesina i BZT₅ parametry ścieków oczyszczonych nie zostały dotrzymane.

Tabela 2. Wskaźniki ścieków surowych i oczyszczonych, I–III 2025 r. (ZWIK Paczków)
Table 2. Raw and treated sewage indicators, January–March 2025 (ZWIK Paczków)

	Ściek surowy (ściek oczyszczony)	Ściek surowy (ściek oczyszczony)	Ściek surowy (ściek oczyszczony)	Pozwolenie wodnoprawne (+50% awaria)
Data poboru	07–08. 01.2025	05–06. 02.2025	05–06. 03.2025	–
Zawiesina ogólna, mg/dm ³	231 (64,45)	295 (65,4)	268 (33,2)	35,0 (45)
ChZTCr, mg/dm ³	775 (64,6)	969 (70,2)	679 (38,4)	125,0 (187,5)
BZT5, mgO ₂ /dm ³	180 (11,7)	320 (64,4)	334 (44,3)	25,0 (37,5)
Azot ogólny, mg/dm ³	62,8 (33,3)	62,2 (33,9)	68,6 (47,95)	nie określono
Fosfor ogólny, mg/dm ³	6,98 (35,2)	6,60 (48,8)	7,95 (45,7)	nie określono
Węglowodory ropopochodne mg/dm ³	-	<1,0	-	nie określono



Rys. 5. Redukcja (%) podstawowych wskaźników ścieków w okresie 12.2024 – 03.2025 (ZWIK Paczków)

Fig. 5. Reduction (%) of basic sewage indicators in the period December 2024 – March 2025 (ZWIK Paczków)

3.4. Tymczasowa technologia oczyszczania ścieków

W 11.2025 została uruchomiona tymczasowa instalacja oczyszczania ścieków. Od tego momentu oczyszczalnia działa według schematu pokazanego na rys. 6.

Ścieki mechanicznie oczyszczone pozbawione skrętek i piasku przepływają grawitacyjnie do przepompowni P2 skąd tłoczone są do węzła rozdzielającego ścieki do zbiornika retencyjno-uśredniającego. Ścieki ze zbiornika retencyjno-uśredniającego, w funkcji pracy reaktora SBR tłoczone są do tego reaktora w fazie

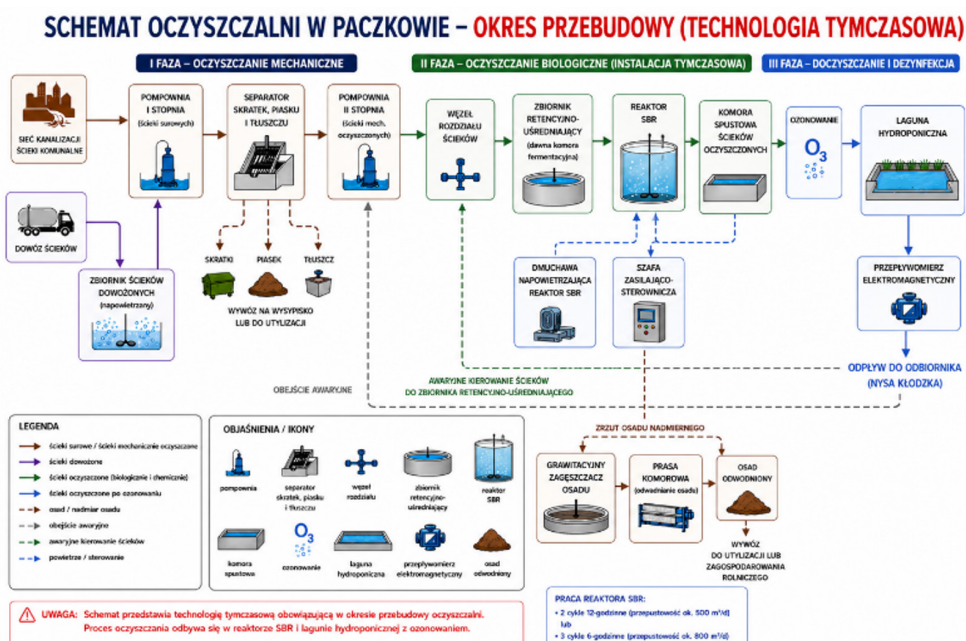
napełniania. Dla uzyskania wymaganej przepustowości reaktora SBR niezbędna jest jego praca w dwóch cyklach 12 godzinnych (przepustowość 500 m³/d) lub 3 cyklach 6 godzinnych na dobę (przepustowość 800 m³/d). Ilość cykli zależna jest od ilości ścieków dopływających do oczyszczalni, ładunku zanieczyszczeń oraz parametrów ścieków oczyszczonych odprowadzanych do odbiornika. Operator oczyszczalni ma dostęp z poziomu sterowni do monitoringu stanu pracy oczyszczalni tymczasowej i możliwość regulacji pracy obiektów technologicznych i urządzeń. Z reaktora SBR ścieki oczyszczone są kierowane na lagunę, gdzie są ozonowane i dalej odpływają do rzeki Nysy Kłodzkiej.

Tymczasowa technologia oczyszczania bazuje poniższych obiektach:

I Obiekty istniejące: przepompownia ścieków surowych P1, punkt zlewny ścieków dowiezionych, sito-piaskownik, przepompownia ścieków mechanicznie oczyszczonych P2, laguna hydroponiczna, system ozonowania ścieków, komora pomiarowa ścieków oczyszczonych, grawitacyjny zagęszczacz osadu, stacja odwadniania osadu.

II Obiekty istniejące / modernizowane: zbiornik retencyjno-uśredniający (dawna komora fermentacyjna), reaktor SBR na bazie istniejącego zbiornika retencyjnego (rys. 7), komora spustowa ścieków oczyszczonych z reaktora SBR, rurociągi technologiczne oczyszczalni tymczasowej, dmuchawa napowietrzająca reaktora SBR, szafa zasilająco-sterownicza oczyszczalni tymczasowej.

Przeprowadzone analizy za okres od uruchomienia tymczasowego ciągu technologicznego do 06.2026 wykazały, że proces oczyszczania ścieków w oczyszczalni został ustabilizowany, osiągając w ten sposób wymagane wskaźniki zanieczyszczeń w ściekach na odpływie (tab. 3, rys. 8). Szczególnie widoczne jest to od 11.2025.



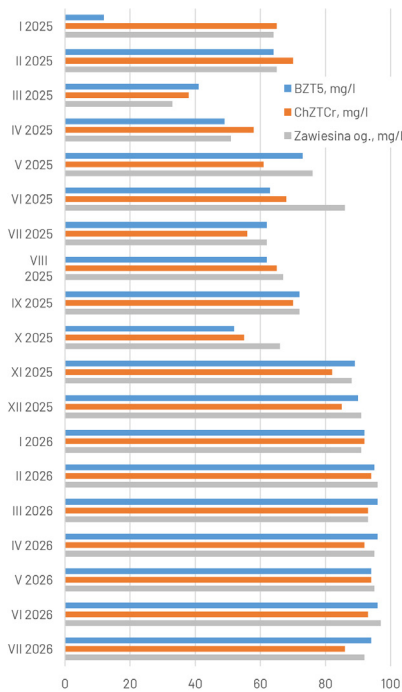
Rys. 6. Tymczasowy schemat technologiczny oczyszczalni ścieków na okres odbudowy (ZWIK Paczków)

Fig. 6. Temporary technological diagram of the sewage treatment plant for the reconstruction period (ZWIK Paczków)



Rys. 7. Reaktor SBR adaptowany na bazie zbiornika retencyjnego (ZWIK Paczków)

Fig. 7. SBR reactor adapted on the basis of a retention tank (ZWIK Paczków)



Rys. 8. Redukcja (%) podstawowych wskaźników ścieków w okresie I/2025–VII/2026

Fig. 8. Reduction (%) of basic sewage indicators in the period I/2025–VII/2026

Tabela 3. Wskaźniki ścieków surowych i oczyszczonych w okresie 01.2025–07.2026 r. (ZWIK Paczków)
Table 3. Raw and treated sewage indicators in the period January 2025–July 2026 (ZWIK Paczków)

Parametr	2025	2026 (I–VII)	2025	2026 (I–VII)	2025	2026 (I–VII)	Pozwolenie wodnoprawne
	Maksymalna		Minimalna		Średnia		
Ilość ścieków dopływających, m³/d	2199 (IV)	1162 (I)	280 (VII)	511 (V)	822,5	700,34	2500,00
Ścieki surowe dopływające do oczyszczalni							
Zawiesina, mg·dm³	392 (VI)	852 (VI)	108 (VII)	266 (VI)	238,83	443,86	
ChZTcr, mg/dm³	969 (I)	1240 (VI)	432 (VII)	634 (III)	697,33	838,57	
BZT5, mgO₂/dm³	383 (XII)	628 (VI)	191 (VII)	237 (II)	271,17	403,00	
Ścieki oczyszczone							
Zawiesina, mg/dm³	179 (III)	37,1 (I)	22 (XII)	11,2 (IV)	71,09	20,97	35,0
ChZTcr, mg/dm³	418 (III)	91,5 (VII)	127 (XII)	36,8 (II)	236,67	62,67	125,0
BZT5, mgO₂/dm³	197 (III)	28,6 (VII)	27,3 (XII)	7,4 (III)	99,88	19,90	25,0
Redukcja (%)							
Zawiesina, %	88,47	97,79	33,21	91,51	68,98	94,87	
ChZTcr, %	70,2	94,14	38,44	86,64	64,73	92,39	
BZT5, %	72,2	96,88	11,67	92,78	61,19	95,22	

4. Podsumowanie – dyskusja wyników

Przeprowadzone badania pozwoliły na kompleksową ocenę wpływu katastrofalnej powodzi z 09.2024 na funkcjonowanie Miejskiej Oczyszczalni Ścieków w Paczkowie oraz ocenę skuteczności działań podjętych w celu przywrócenia ciągłości oczyszczania ścieków.

Przed wystąpieniem powodzi klasyczny układ osadu czynnego z biologicznym usuwaniem azotu i fosforu oraz innowacyjnym trzecim stopniem oczyszczania w lagunie hydroponicznej umożliwiał uzyskanie parametrów ścieków oczyszczonych znacznie lepszych od wymaganych w pozwoleniu wodnoprawnym. Uzyskane wyniki są zgodne z obserwacjami przedstawionymi przez Cooper i wsp. [3] oraz Jakubaszek [4], którzy wykazali wysoką skuteczność lagun hydroponicznych.

Katastrofalna powódź z 09.2024 spowodowała niemal całkowite zniszczenie infrastruktury technologicznej oczyszczalni. Analiza uszkodzeń wykazała, że największą podatność na oddziaływanie wody powodziowej wykazują urządzenia technologiczne i elektryczne zlokalizowane poniżej poziomu zalewu, natomiast elementy konstrukcyjne obiektów żelbetowych zachowały możliwość dalszego wykorzystania po przeprowadzeniu odpowiednich prac remontowych lub modernizacyjnych.

W bardzo krótkim czasie uruchomiono rozwiązania umożliwiające ograniczenie zagrożenia sanitarnego i środowiskowego, obejmujące między innymi: budowę tymczasowego systemu przepompowywania ścieków z wykorzystaniem agregatów prądotwórczych, organizację transportu ścieków do sąsiednich oczyszczalni, wykorzystanie istniejącej laguny jako zbiornika retencyjnego, sukcesywne oczyszczanie i odmulanie zalanych obiektów, odtworzenie podstawowych funkcji technologicznych przy wykorzystaniu sprawnych elementów infrastruktury. Działania te umożliwiły utrzymanie ciągłości odbioru ścieków z terenu aglomeracji, mimo praktycznie całkowitego zniszczenia zasadniczego ciągu technologicznego. Z punktu widzenia bezpieczeństwa sanitarnego była to decyzja o kluczowym znaczeniu dla ograniczenia zagrożeń epidemiologicznych oraz ochrony środowiska.

Wyniki badań wykazały, że awaryjny układ oparty głównie na mechanicznym podczyszczaniu ścieków oraz lagunie hydroponicznej nie był w stanie zapewnić stabilnych parametrów ścieków oczyszczonych. W okresie od stycznia do marca 2025 obserwowano znaczne wahania skuteczności usuwania zawie-

siny, BZT₅ oraz ChZT, które były bezpośrednio związane z dużą zmiennością jakości ścieków dopływających z kanalizacji ogólnospławnej.

Istotnym osiągnięciem przedstawionym w pracy było opracowanie oraz wdrożenie tymczasowej technologii oczyszczania ścieków wykorzystującej reaktor sekwencyjny SBR, istniejące elementy infrastruktury oczyszczalni, lagunę hydroponiczną oraz system ozonowania ścieków. Rozwiązanie to umożliwiło wykorzystanie zachowanych elementów istniejącej infrastruktury przy jednoczesnym ograniczeniu kosztów inwestycyjnych i skróceniu czasu przywracania funkcjonalności oczyszczalni.

Przeprowadzone analizy eksploatacyjne wykazały wyraźną poprawę jakości ścieków oczyszczonych po uruchomieniu reaktora SBR. Proces biologicznego oczyszczania został ustabilizowany, a uzyskiwane parametry ścieków zaczęły spełniać wymagania określone w obowiązującym pozwoleniu wodnoprawnym. Szczególnie istotna była znacznie większa odporność nowego układu technologicznego na zmienność hydrauliczną i jakościowego obciążenia oczyszczalni, charakterystyczną dla kanalizacji ogólnospławnej.

Na uwagę zasługuje również zastosowanie procesu ozonowania jako elementu wspomagającego pracę oczyszczalni. Ozonowanie nie zastępuje procesów biologicznych, jednak skutecznie ogranicza liczbę mikroorganizmów chorobotwórczych, poprawia natlenienie ścieków odprowadzanych do odbiornika oraz redukuje uciążliwości zapachowe. W warunkach pracy awaryjnej rozwiązanie to istotnie zwiększyło bezpieczeństwo ekologiczne odbiornika, ograniczając ryzyko lokalnych deficytów tlenowych w rzece Nysie Kłodzkiej.

Przeprowadzone badania wskazują również na potrzebę zmiany podejścia do projektowania obiektów infrastruktury krytycznej zlokalizowanych na terenach zagrożonych powodzią. Dotychczas dominującym kryterium projektowym była optymalizacja kosztów inwestycyjnych oraz funkcjonalności technologicznej. Doświadczenia z powodzi w roku 2024 pokazują jednak, że równie istotnym kryterium powinna być odporność infrastruktury na zjawiska ekstremalne wynikające ze zmian klimatu.

Oznacza to konieczność: podwyższania rzędnych posadowienia obiektów technologicznych, lokalizowania urządzeń elektrycznych i systemów automatyki powyżej przewidywanego poziomu zalewu, zapewnienia możliwości szybkiego przełączenia oczyszczalni na tryb awaryjny, stosowania modułowych układów technologicznych umożliwiających etapową odbudowę, projektowania dodatkowej retencji ścieków oraz awaryjnych źródeł zasilania.

Przedstawione rozwiązania mają charakter uniwersalny i mogą zostać wykorzystane podczas odbudowy innych oczyszczalni ścieków uszkodzonych wskutek powodzi lub innych katastrof naturalnych.

Uzyskane wyniki potwierdzają zasadność budowy nowej oczyszczalni ścieków w Paczkowie z wykorzystaniem nowoczesnych technologii oczyszczania oraz zachowaniem najlepszych dostępnych praktyk (BAT). Nowy obiekt powinien uwzględniać doświadczenia wyniesione z powodzi z roku 2024, w szczególności zwiększoną odporność na zalanie, możliwość prowadzenia pracy awaryjnej oraz wykorzystanie rozwiązań zapewniających wysoką efektywność energetyczną i eksploatacyjną.

W szerszej skali regionalnej wyniki badań potwierdzają również, że trwałe ograniczenie ryzyka powodziowego w zlewni

Nysy Kłodzkiej wymaga równoległej realizacji działań systemowych przewidzianych w programie redukcji ryzyka powodziowego, obejmujących budowę zbiornika Kamieniec Ząbkowicki oraz innych obiektów retencyjnych [5]. Dopiero połączenie działań hydrotechnicznych z odpowiednio zaprojektowaną, odporną na ekstremalne zjawiska infrastrukturą komunalną pozwoli na znaczące ograniczenie strat środowiskowych, społecznych i gospodarczych podczas przyszłych powodzi.

Podsumowując, przeprowadzone badania wykazały, że mimo niemal całkowitego zniszczenia oczyszczalni możliwe było zachowanie ciągłości gospodarki ściekowej dzięki szybkim działaniom organizacyjnym oraz zastosowaniu innowacyjnych rozwiązań technologicznych. Opracowana i wdrożona technologia tymczasowa potwierdziła swoją skuteczność oraz może stanowić model postępowania dla innych jednostek samorządowych i przedsiębiorstw wodociągowo-kanalizacyjnych przygotowujących procedury reagowania na sytuacje kryzysowe związane z występowaniem powodzi.

Warto podkreślić, że wdrożona technologia tymczasowa nie stanowiła rozwiązania odtworzeniowego, lecz była przykładem adaptacyjnego wykorzystania zachowanej infrastruktury oczyszczalni, pozwalającego na znaczące ograniczenie kosztów inwestycyjnych i skrócenie czasu przywracania funkcjonalności obiektu.

Istotnym wnioskiem wynikającym z przeprowadzonych analiz jest wpływ charakteru systemu kanalizacyjnego na pracę oczyszczalni. Aglomeracja Paczków wyposażona jest głównie w kanalizację ogólnospławną, co powoduje znaczną nierównomierność dopływu ścieków zarówno pod względem hydraulicznym, jak i jakościowym. W okresach intensywnych opadów oraz roztopów do oczyszczalni dopływają znacznie większe ilości ścieków rozcieńczonych wodami opadowymi, natomiast w okresach bezdeszczowych obserwuje się stosunkowo niewielkie przepływy przy wysokich stężeniach zanieczyszczeń. Tak duża zmienność obciążenia hydraulicznego stanowi jedno z podstawowych wyzwań eksploatacyjnych dla oczyszczalni ścieków wykorzystujących procesy biologiczne. Uzyskane wyniki badań wskazują, że projektowana oczyszczalnia powinna być wyposażona w odpowiednią retencję hydrauliczną umożliwiającą czasowe magazynowanie nadmiaru ścieków podczas opadów nawalnych oraz ich stopniowe kierowanie do procesu biologicznego. Zastosowanie zbiornika retencyjno-uśredniającego wraz z reaktorem SBR pozwala nie tylko na wyrównanie chwilowych przepływów, ale również stabilizuje ładunek zanieczyszczeń dopływających do reaktora biologicznego, co przekłada się na większą efektywność usuwania związków organicznych i biogenów. Rozwiązanie takie zwiększa odporność oczyszczalni na zjawiska ekstremalne oraz poprawia bezpieczeństwo eksploatacji w warunkach obserwowanych zmian klimatu. Doświadczenia uzyskane podczas odbudowy oczyszczalni wskazują, że przyszłe inwestycje w zakresie infrastruktury wodno-kanalizacyjnej powinny uwzględniać nie tylko wymagania technologiczne wynikające z obowiązujących przepisów, lecz również odporność obiektów na skutki zmian klimatu. Oznacza to konieczność projektowania oczyszczalni z odpowiednim zapasem retencji hydraulicznej, możliwością pracy w warunkach znacznych nierównomierności dopływu ścieków oraz możliwością funkcjonowania w trybie awaryjnym. Szczególnie w aglomeracjach wyposażonych w kanalizację ogólnospławną retencja ścieków staje się obecnie jednym z podsta-

wowych elementów zapewniających stabilność procesu oczyszczania oraz ograniczenie ryzyka niekontrolowanych zrzutów do odbiorników.

5. Literatura

- [1] Rak, A., Duda, A., Rak, D., & Schmolke, P. (2024). *Miejska Oczyszczalnia Ścieków w Paczkowie. Ocena zniszczeń i stanu obiektu spowodowanych przez powódź – wrzesień 2024 wraz z charakterystyką obiektu w zakresie konstrukcyjno-budowlanym, technologicznym, automatyki i sterowania* [Niepublikowany maszynopis]. Urząd Miasta i Gminy w Paczkowie.
- [2] Bawiec, A., Paweska, K., Zawalek, T., & Pulikowski, K. (2013). Ocena redukcji zanieczyszczeń w oczyszczalni hydroponicznej. *Infrastruktura i Ekologia Terenów Wiejskich* Nr 1/IV/2013, s. 99–111.
- [3] Cooper, P. F., Job, G. D., Green, M. B., & Shutes, R. B. E. (1996). *Reed beds and constructed wetlands for wastewater treatment*. Swindon: Water Research Centre.
- [4] Jakubaszek, A. (2022). Pollutants removal efficiency in the hydroponic lagoon of the wastewater treatment plant. *Civil and environmental engineering reports*, 32(4). 293–305. <https://doi.org/10.2478/ceer-2022-0059>
- [5] Zaleski, J., & Balcerowicz, M. (2025). *Program redukcji ryzyka powodziowego w zlewni Nysy Kłodzkiej*. BKP PGW Wody Polskie, SWECO, GISPartner, IMGW-PIB, RZGW Wrocław
- [6] Marek, K., Pawęska, K., Bawiec, A., & Baran, J. (2021). Sewage flow conditions in a hydroponic lagoon in terms of quality of treated wastewater. *Water, Air, & Soil Pollution*, 232, 277. <https://doi.org/10.1007/s11270-021-05235-8>
- [7] Padlo L., Machowicz J., 2000. *Księga eksploatacji oczyszczalni. Miejska Oczyszczalnia Ścieków w Paczkowie*
- [8] Rastinifard, N., & Tota-Maharaj, K. (2026). Constructed wetlands as nature-based solutions for wastewater treatment: A scoping review of iucn global standard reporting and complementary advanced oxidation polishing. *Nature-Based Solutions*, 9, 100318. <https://doi.org/10.1016/j.nbsj.2026.100318>
- [9] Państwowe Gospodarstwo Wodne Wody Polskie. (2020). *Decyzja – pozwolenie wodnoprawne z dnia 13 marca 2020 r. dla ZWiK Paczków na wprowadzenie oczyszczonych ścieków komunalnych do Nysy Kłodzkiej w km 88+630* [Decyzja administracyjna]
- [10] Państwowe Gospodarstwo Wodne Wody Polskie. (2025). *Decyzja – pozwolenie wodnoprawne z dnia 11 marca 2025 r. dla ZWiK Paczków na wprowadzenie oczyszczonych ścieków komunalnych do Nysy Kłodzkiej w km 88+630* [Decyzja administracyjna]
- [11] Państwowe Gospodarstwo Wodne Wody Polskie. (2025). *Decyzja nr 111/2025 z dnia 28 maja 2025 r. korygująca pozwolenie wodnoprawne z dnia 11 marca 2025 r. dla ZWiK Paczków na wprowadzenie oczyszczonych ścieków komunalnych do Nysy Kłodzkiej w km 88+630* [Decyzja administracyjna].
- [12] Banasiak, R. (2025). Wstępna ocena przejścia powodzi na Odrze we wrześniu 2024. *Gospodarka Wodna*, 2, 2–6. <https://doi.org/10.15199/22.2025.2.1>
- [13] Askari, S. S., Giri, B. S., Basheer, F., Izhar, T., Ahmad, S. A., & Mumtaz, N. (2024). Enhancing sequencing batch reactors for efficient wastewater treatment across diverse applications: A comprehensive review. *Environmental Research*, 260, 119656. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2024.119656>
- [14] Lim, S., Shi, J. L., Von Gunten, U., & McCurry, D. L. (2022). Ozonation of organic compounds in water and wastewater: A critical review. *Water Research*, 213, 118053. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2022.118053>
- [15] Vymazal, J. (2010). Constructed wetlands for wastewater treatment. *Water*, 2(3), 530–549. <https://doi.org/10.3390/w2030530>
- [16] Zawalek, T. (2010). Czy oczyszczalnia ścieków może być bardziej Eko. In *Forum Eksploatatora*, s. 36–38.



Politechnika Wrocławska

ŚWIATOWY KONGRES ABSOLWENTÓW

16-17 października 2026

POLITECHNIKI WROCŁAWSKIEJ



Alumni PWr
Stowarzyszenie Absolwentów
Politechniki Wrocławskiej





Wrocław
miasto spotkań



DOLNY ŚLĄSK



ŁĄCZY NAS WIĘCEJ NIŻ STUDIA

Przydatność testów zlewkowych do doboru polimerów stosowanych w odwadnianiu osadów ściekowych

The suitability of jar tests for the selection of polymers used in sewage sludge dewatering

Martyna Michalik¹, Justyna Górka^{1*}

¹ Wydział Inżynierii Środowiska i Energetyki, Politechnika Krakowska

* Kontakt / Correspondence: justyna.gorka@pk.edu.pl

Streszczenie:

Wydajność procesu odwadniania osadów ściekowych zależy głównie od właściwego doboru rodzaju i dawki polimeru stosowanego podczas kondycjonowania chemicznego. W warunkach eksploatacyjnych do wstępnego doboru rodzaju i dawki polielektrolitów stosuje się testy zlewkowe, których wyniki mają charakter jakościowy. Metodę tę porównano z wartościami czasu ssania kapilarnego (CSK) i oporu właściwego filtracji (OWF) podczas doboru rodzaju i dawki polielektrolitów. Uzyskane wyniki wykazały, że testy zlewkowe stanowią użyteczne narzędzie do wstępnej selekcji polimerów, jednak ostateczny dobór rodzaju i dawki preparatu powinien być potwierdzony metodami ilościowymi, takimi jak CSK i OWF.

Słowa kluczowe: odwadnianie osadów ściekowych, kondycjonowanie osadów ściekowych, testy zlewkowe, CSK, OWF

Abstract:

The efficiency of sewage sludge dewatering depends primarily on the appropriate selection of the type and dose of polymer used for chemical conditioning. Under operating conditions, jar tests are commonly used for the preliminary selection of polyelectrolyte type and dose; however, their results are primarily qualitative. The aim of this study was to compare the results of jar tests with capillary suction time (CSK) and specific resistance to filtration (OWF) measurements in the selection of the type and dose of polyelectrolyte. The results demonstrated that jar tests are a useful tool for the preliminary screening of polymers. However, the final selection of the polymer type and dose should be supported by quantitative methods, such as CSK and OWF measurements.

Keywords: dewaterability, sludge conditioning, beaker tests, CSK, OWF

1. Wstęp

Gospodarka osadowa stanowi jeden z kluczowych elementów funkcjonowania oczyszczalni ścieków. Wraz z rosnącymi wymaganiami środowiskowymi oraz wzrostem kosztów zagospodarowania osadów coraz większego znaczenia nabiera optymalizacja procesów ich przetwarzania, w tym przede wszystkim efektywnego odwadniania [15]. Według danych Eurostatu w krajach Unii Europejskiej rocznie wytwarza się około 15 mln ton suchej masy osadów ściekowych, z czego w Polsce około 568,86 tys. Mg suchej masy [4]. Tak znaczna ilość generowanych osadów powoduje, że zwiększenie efektywności ich przetwarzania oraz ograniczenie kosztów zagospodarowania należą do najważniejszych wyzwań eksploatacyjnych współczesnych oczyszczalni ścieków [11].

Jednym z najistotniejszych etapów gospodarki osadowej jest

proces odwadniania, którego celem jest zmniejszenie zawartości wody w osadzie, a tym samym ograniczenie jego objętości i masy [6]. Skuteczne odwadnianie przekłada się bezpośrednio na obniżenie kosztów transportu, magazynowania oraz końcowego zagospodarowania osadów, a także wpływa na efektywność kolejnych procesów technologicznych, takich jak suszenie czy termiczne przekształcanie. Proces odwadniania poprzedzony jest zazwyczaj stabilizacją osadów i obejmuje kolejne etapy zagęszczania, mechanicznego odwadniania oraz – w zależności od przyjętej technologii – suszenia. W wyniku tych procesów uzyskuje się osad o znacznie mniejszej zawartości wody, co ułatwia jego dalsze przetwarzanie i ogranicza koszty eksploatacyjne [3].

Osad ściekowy jest układem wielofazowym złożonym z fazy stałej oraz ciekłej. Faza stała obejmuje substancje nierozpuszczalne pochodzenia organicznego i mineralnego, natomiast fazę ciekłą

stanowi woda wraz z rozpuszczonymi związkami chemicznymi [7, 14]. Woda obecna w osadach występuje w kilku postaciach różniących się stopniem związania z cząstkami osadu, co ma zasadniczy wpływ na skuteczność procesu odwadniania. Wyróżnia się wodę wolną, wodę związaną w strukturach koloidalnych, wodę kapilarną oraz wodę biologicznie związaną. Spośród nich jedynie woda wolna może być stosunkowo łatwo usunięta metodami mechanicznymi, natomiast usunięcie pozostałych frakcji wymaga odpowiedniego kondycjonowania osadu oraz zastosowania właściwie dobranej technologii odwadniania [9].

Efektywność procesu odwadniania w oczyszczalni ścieków zależy od rodzaju zastosowanego urządzenia (prasy lub wirówki) oraz właściwości fizyczno-chemicznych osadów. W praktyce, w celu poprawy podatności na odwadnianie stosuje się kondycjonowanie osadów, którego celem jest poprawa właściwości filtracyjnych osadów poprzez destabilizację układu koloidalnego oraz tworzenie trwałych agregatów cząstek. Najczęściej stosowanymi środkami kondycjonującymi są polielektrolity kationowe [5]. Ich działanie polega na neutralizacji ładunków powierzchniowych cząstek osadów oraz tworzeniu mostków polimerowych pomiędzy nimi, co prowadzi do powstawania większych i bardziej zwartych floków [1, 2]. Odpowiedni dobór rodzaju oraz dawki polimeru ma bezpośredni wpływ na skuteczność odwadniania, jakość odcieku oraz zawartość suchej masy w odwodnionym osadzie. Dobór ich rodzaju i dawki w oczyszczalni ścieków najczęściej jest prowadzony z wykorzystaniem testów zlewowych. Testy zlewkowe umożliwiają ocenę przebiegu flokulacji, wielkości i stabilności powstałych kłaczków oraz klarowności odcieku. Ze względu na to, że do tego typu testów nie trzeba specjalistycznej aparatury, testy zlewkowe stanowią podstawowe narzędzie wykorzystywane podczas optymalizacji procesu kondycjonowania. Wyniki testów zlewkowych mają charakter jakościowy i opierają się na ocenie wizualnej, co w praktyce nie zawsze się przekłada na rzeczywistą poprawę podatności osadów na odwadnianie. Wobec tego, w badaniach laboratoryjnych wykorzystuje się inne ilościowe wskaźniki oceny właściwości filtracyjnych osadów, takie jak czas ssania kapilarnego (CSK) i opór właściwy filtracji (OWF) [13]. Parametr CSK określa szybkość oddawania wody przez osad pod wpływem sił kapilarnych i jest uznawany za szybki wskaźnik skuteczności kondycjonowania [8]. Z kolei, OWF opisuje opór stawiany przez warstwę osadu podczas filtracji i stanowi jeden z najbardziej rozpowszechnionych parametrów wykorzystywanych do oceny właściwości filtracyjnych osadów [10]. W licznych badaniach wskazuje się jednak, że CSK i OWF opisują odmienne zjawiska fizyczne zachodzące podczas procesu odwadniania, dlatego nie zawsze wykazują pełną zgodność z wynikami uzyskiwanymi w skali technicznej.

W literaturze dostępnych jest wiele opracowań poświęconych wpływowi rodzaju polimeru na wartości CSK i OWF oraz efektywność mechanicznego odwadniania [6, 12]. Znacznie rzadziej analizowana jest natomiast zależność pomiędzy prostą oceną wizualną uzyskaną podczas testów zlewkowych a ilościowymi wskaźnikami odwadnialności. Tymczasem odpowiedź na pytanie, czy test zlewkowy może stanowić wiarygodne narzędzie doboru polielektrolitu, ma istotne znaczenie praktyczne dla eksploatacji oczyszczalni ścieków, gdyż pozwala ograniczyć liczbę kosztownych i czasochłonnych analiz laboratoryjnych [16]. Wobec tego, celem pracy była ocena przydatności testów zlewkowych do dobo-

ru polimerów stosowanych w procesie kondycjonowania osadów ściekowych oraz porównanie uzyskanych wyników z wartościami wskaźników CSK i OWF na podstawie badań przeprowadzonych dla osadów pochodzących z komunalnej oczyszczalni ścieków.

2. Materiał i metody

2.1. Osad ściekowy

Wykorzystano osad ściekowy z miejskiej mechaniczno-biologicznej oczyszczalni ścieków o przepustowości 150 000 m³/d. Stanowił on mieszaninę osadów wstępnego i wtórnego po procesie stabilizacji beztlenowej (osad przefermentowany). Podstawową charakterystykę fizyczno-chemiczną osadu przedstawiono w tabeli 1.

Tabela 1. Charakterystyka fizyko-chemiczna osadu ściekowego (Opracowanie własne)
Table 1. Physicochemical characteristics of sewage sludge (Own elaboration)

Parametr	Wartość
pH	6,9 ± 0,4
Sucha masa, g·dm ⁻³	39 ± 3,1
Sucha masa organiczna, g·dm ⁻³	21 ± 4,2
Chemiczne zapotrzebowanie na tlen, mg O ₂ ·dm ⁻³	26 820 ± 1 500

2.2. Metodyka oznaczania podatności na odwadnianie osadu

Testy zlewkowe oraz pomiary czasu ssania kapilarnego wykorzystano do wstępnej selekcji polielektrolitów. Następnie dla wybranego preparatu określono optymalną dawkę, uwzględniając wyniki testów zlewkowych, czasu ssania kapilarnego oraz oporu właściwego filtracji.

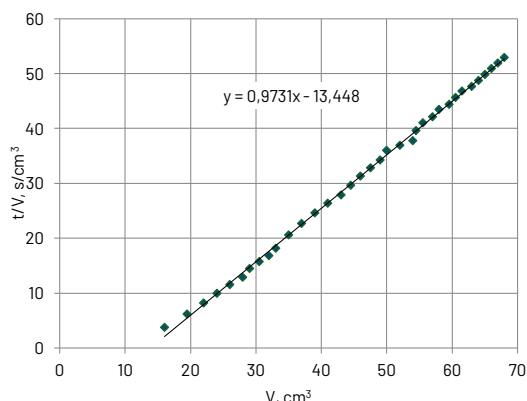
2.3. Oznaczanie czasu ssania kapilarnego

Pomiar czasu ssania kapilarnego osadów prowadzono z użyciem urządzenia do pomiaru czasu ssania kapilarnego Envolab, zgodnie z normą PN-EN 14701-1:2007P. Urządzenie składa się z prostokątnej płytki, w której umieszcza się bibułę (Whatman 17 Chr). Następnie bibułę nakrywa się górną płytką ze stykami (umieszczone na okręgach o średnicy 4,5 i 3,2 cm). Górna płytka zakończona jest otworem, do którego przyczepia się cylinder ze stali nierdzewnej wypełniony osadem. Pomiar czasu ssania kapilarnego odbywa się w momencie, gdy plama cieczy na bibule pokona drogę pomiędzy dwoma stykami. Do cylindra wprowadzono 3 cm³ osadu. Każdy wariant badawczy oznaczano w trzech powtórzeniach.

2.4. Oznaczanie oporu właściwego filtracji

Urządzenie do pomiaru oporu właściwego filtracji zostało skonstruowane przez Autorów pracy w oparciu o normę PN-EN 14701-2:2013-07. Metoda pomiaru polega na sączeniu próbki osadu w warunkach podciśnienia i rejestrowaniu otrzymywanej objętości w czasie. Do badań użyto szklany lejek Buchnera (średnica 80 mm) połączony złączem z cylindrem mia-

rowym (objętość 100 cm³). Do lejka podłączona była również pompa próżniowa z manometrem. W lejku została umieszczona bibuła filtracyjna (Whatman 41) o średnicy 80 mm, na której wprowadzano osad (objętość 100 cm³). Po wytworzeniu w aparacie podciśnienia (50 kPa) rozpoczynano pomiar. Pomiar prowadzono do momentu pojawienia się pęknięcia w placku osadowym lub spadku ciśnienia w aparacie.



Rys. 1. Przykładowy wykres zależności t/V od V (Opracowanie własne)

Fig. 1. Example graph of t/V versus V (Own elaboration)

Każdorazowo po zakończeniu pomiaru wykonywano wykres zależności t/V od V, aby wyznaczyć współczynnik kierunkowy prostej b (stała filtracji). Przykładowy wykres zależności t/V od V przedstawiono na rysunku 1. Wartość oporu wyznaczano zgodnie z równaniem:

$$OWF = \frac{2 \cdot \Delta p \cdot A^2 \cdot b}{\mu \cdot m} \quad (1)$$

gdzie:

Δp – ciśnienie filtracji, Pa

A – powierzchnia filtracji, m²

b – stała filtracji wyznaczona z wykresu zależności t/V od V, s·m⁻⁶

μ – współczynnik lepkości filtratu, Pa·s

m – ilość suchej masy przypadająca na jednostkę objętości filtratu, kg·m⁻³

2.5. Testy zlewkowe

W celu porównania skuteczności badanych polielektrolitów zastosowano zlewkową metodę oceny właściwości flokulacyjnych osadu. Ocenie podlegały: szybkość tworzenia floków, ich wielkość i struktura, odporność na oddziaływania mechaniczne oraz zdolność do ponownej flokulacji po częściowym zniszczeniu agregatów.

Do badań stosowano próbki osadu o objętości 200 cm³ i oznaczonej zawartości suchej masy. Roztwory robocze polielektrolitów przygotowano w wodzie, zgodnie z zaleceniami producenta. Po dodaniu polimeru do próbki osadu prowadzono mieszanie poprzez przelewanie pomiędzy zlewkami (przelanie od zlewki do zlewki) i określano liczbę obrotów niezbędnych do wytworzenia stabilnych floków. Następnie oceniano ich jakość w trzystopniowej skali jakościowej (+ do +++), po czym określano odporność floków na ścinanie poprzez dalsze mieszanie próbki aż do ich częściowego rozpadu. Każdy wariant wykonywano trzech niezależnych powtórzeniach. Wyniki oceny punktowej przedstawiano jako medianę i rozstęp albo jako średnią wraz z miarą zmienności, zależnie od przyjętego sposobu traktowania skali punktowej.

W kolejnym etapie do próbki dodawano dodatkową dawkę polimeru i oceniano zdolność floków do ponownego formowania (reflokulacji). Ostateczną ocenę skuteczności polimeru stanowiła suma punktów uzyskanych w poszczególnych etapach badania. Próbki uzyskujące najwyższe wartości punktowe kwalifikowano do dalszych analiz z wykorzystaniem wskaźników CSK i OWF.

3. Wyniki badań

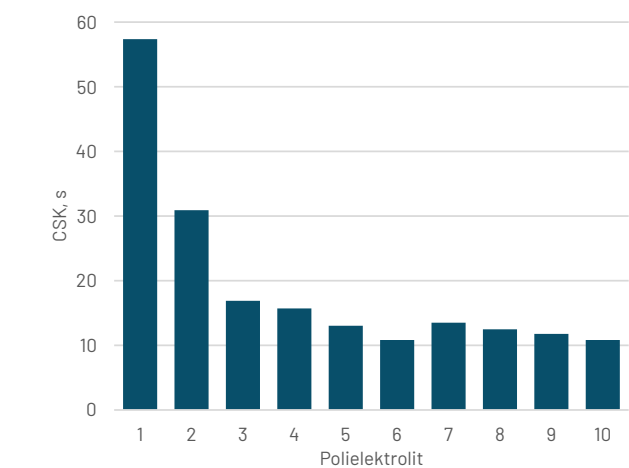
3.1. Dobór polielektrolitu

W celu wytypowania najbardziej efektywnych środków kondycjonujących przeprowadzono testy zlewkowe dla dziesięciu badanych polielektrolitów różniących się kationowością przy jednakowej dawce wynoszącej 11 ml. Wyniki zestawiono w tabeli 2. Najwyższe wartości punktowe uzyskał polimer nr 10, osiągając odpowiednio 33 punkty. Charakteryzował się on najwyższą oceną jakości floków (+++) oraz największą odpornością na oddziaływania mechaniczne.

Tabela 2. Wyniki testu zlewkowego na dobór polielektrolitu (Opracowanie własne)

Table 2. Results of the beaker test for polyelectrolyte selection (Own elaboration)

Rodzaj polielektrolitu	Ilość polielektrolitu [ml]	Ilość obrotów do wytworzenia kłaczków	Ocena	Ilość obrotów do rozbicia kłaczków	Reflokulacja	Ilość obrotów do zniszczenia kłaczków	Suma
1	11	10	-	10	-	-	18
2	11	9	+	2	5	2	19
3	11	9	+	3	4	4	21
4	11	12	+	4	4	6	27
5	11	9	++	4	4	8	27
6	11	9	++	4	3	7	25
7	11	9	+++	4	3	14	33
8	11	9	+	4	4	5	23
9	11	8	+	3	4	4	20
10	11	9	++	4	4	8	27



Rys. 2. Wyniki pomiarów czasu ssania kapilarnego w procesie doboru polielektrolitu (Opracowanie własne)
Fig. 2. Capillary time test results in the polyelectrolyte selection process (Own elaboration)

Na rys. 2 przedstawiono wartości czasu ssania kapilarnego osadu kondycjonowanego badanymi polielektrolitami. Rodzaj zastosowanego preparatu wyraźnie wpływał na podatność osadu na odwadnianie. Najwyższą wartość CSK, wynoszącą około 57 s, uzyskano po zastosowaniu polielektrolitu nr 1. W przypadku polielektrolitu nr 2 czas ssania kapilarnego wynosił około 31 s. Wyniki te wskazują na stosunkowo niewielką skuteczność obu preparatów w poprawie właściwości odwadniających osadu.

Zastosowanie pozostałych polielektrolitów spowodowało wyraźne obniżenie wartości CSK. Dla preparatów nr 3 i 4 uzyskano wartości wynoszące około 16–17 s, natomiast dla polielektrolitów nr 5–10 wartości CSK mieściły się przeważnie w przedziale od około 11 do 13 s. Najniższe wartości czasu ssania kapilarnego odnotowano dla polielektrolitów nr 6, 9 i 10, co wskazuje na najlepszą zdolność osadu do oddawania wody po zastosowaniu tych preparatów.

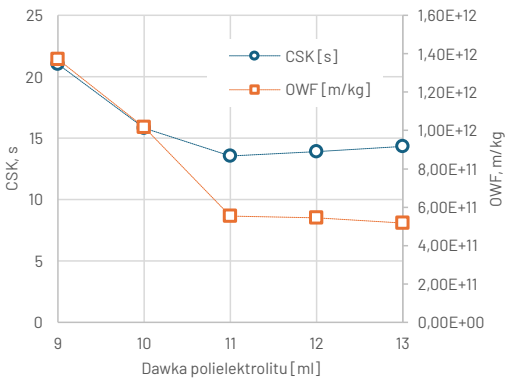
Różnice pomiędzy polielektrolitami nr 5–10 były jednak niewielkie, dlatego na podstawie samego pomiaru CSK jednoznaczny wybór najlepszego preparatu był utrudniony. W tym zakresie konieczne było uwzględnienie również wyników testów zlewkowych, w tym szybkości tworzenia floków, ich odporności na ścinanie oraz zdolności do reflokulacji.

Na szczególną uwagę zasługuje polielektrolit nr 7, który w teście zlewkowym uzyskał najwyższą sumę punktów oraz najwyższą ocenę jakości floków (+++), natomiast nie charakteryzował się najniższą wartością CSK. Wynik ten wskazuje, że najlepsza ocena wizualna i mechaniczna floków nie musi odpowiadać naj-

niższemu czasowi ssania kapilarnego. Natomiast, różnice pomiędzy CSK są tak niewielkie, że z praktycznego punktu widzenia nie miały istotnego znaczenia technologicznego.

3.2. Dobór dawki polielektrolitu

Na podstawie wyników poprzedniego etapu do dalszych badań wytypowano polimer nr 7. Przeprowadzono badania wpływu dawki na wyniki testów zlewkowych oraz wartości wskaźników czasu ssania kapilarnego i oporu właściwego filtracji. Zakres badanych dawek wynosił od 9 do 13 ml. Wyniki testów zlewkowych zestawiono w tabeli 3. Analiza wyników wykazała, że wzrost dawki polielektrolitu powodował poprawę właściwości flokulacyjnych osadu oraz zwiększenie jego podatności na odwadnianie. Najwyższą ocenę jakości floków (+++) uzyskano dla dawki 12 ml, natomiast największą sumę punktów w teście zlewkowym odnotowano dla dawki 13 ml.



Rys. 3. Wyniki czasu ssania kapilarnego i oporu właściwego filtracji w procesie doboru dawki polielektrolitu (Opracowanie własne)
Fig. 3. Results of capillary suction time and specific resistance to filtration in the process of selecting the polyelectrolyte dose (Own elaboration)

Wartości czasu ssania kapilarnego malały wraz ze wzrostem dawki polimeru do poziomu 11 ml, dla którego uzyskano najniższą wartość CSK wynoszącą około 13,5 s. Dalsze zwiększanie dawki nie powodowało dalszej poprawy właściwości odwadniających osadu. Natomiast, w przypadku oporu właściwego filtracji obserwowano stopniowy spadek wartości OWF wraz ze wzrostem dawki polimeru, przy czym najniższą wartość uzyskano dla dawki 13 ml. Różnice pomiędzy dawkami 11–13 ml były jednak niewielkie.

Wyniki wskazują, że poszczególne metody oceny opisują różne aspekty procesu odwadniania osadów ściekowych. Testy zlewkowe pozwalają ocenić właściwości flokulacyjne oraz odporność mechaniczną floków, podczas gdy CSK i OWF charakteryzują od-

Tabela 3. Wyniki testu zlewkowego w procesie doboru dawki polielektrolitu (Opracowanie własne)
Table 3. Beaker test results in the process of selecting the polyelectrolyte dose (Own elaboration)

Rodzaj polielektrolitu	Ilość polielektrolitu [ml]	Ilość obrotów do wytworzenia kłaczków	Ocena	Ilość obrotów do rozbicia kłaczków	Reflokulacja	Ilość obrotów do zniszczenia kłaczków	Suma
7	9	6	+	3	3	3	16
	10	6	++	4	3	5	20
	11	5	++	5	3	7	22
	12	5	+++	5	2	7	22
	13	5	++	5	2	10	24

powiednio zdolność osadu do oddawania wody pod wpływem sił kapilarnych oraz opór stawiany podczas filtracji.

Badania potwierdzają wpływ rodzaju i dawki polielektrolitu na właściwości filtracyjne osadów ściekowych. Zastosowania kondycjonowania skutecznie obniża wartości CSK i OWF, co wskazuje na poprawę zdolności osadu do oddawania wody oraz zmniejszenie oporów występujących podczas filtracji. Jednak, poszczególne metody oceny skuteczności odwadniania nie prowadzą do tych samych wniosków. Pomimo występujących różnic wszystkie trzy metody wskazywały na zbliżony zakres wyników. Te rozbieżności wynikają przede wszystkim z faktu, że CSK i OWF oraz testy zlewkowe opisują różne aspekty procesu odwadniania [8, 13, 14]. Parametr CSK określa szybkość migracji wody pod wpływem sił kapilarnych i stanowi wskaźnik łatwości oddawania wody przez osad. Z kolei OWF opisuje opór hydrauliczny stawiany przez płatek filtracyjny podczas przepływu filtratu przez warstwę osadu zgodnie z prawem Darcy'ego. Testy zlewkowe pozwalają natomiast ocenić przebieg flokulacji, wielkość oraz odporność mechaniczną powstających floków [12, 16].

Wyniki badań wskazują, że uzyskanie dużych i stabilnych floków nie zawsze prowadzi do uzyskania najniższych wartości CSK i OWF. Floki charakteryzujące się wysoką wytrzymałością mechaniczną mogą jednocześnie tworzyć bardziej zwartą strukturę płacka filtracyjnego, utrudniając przepływ filtratu. Z drugiej strony bardzo niskie wartości CSK nie muszą oznaczać odpowiedniej odporności floków na oddziaływania mechaniczne występujące podczas pracy urządzeń odwadniających, szczególnie wirówek i pras taśmowych [13, 14, 16].

Uzyskane wyniki potwierdzają zatem zasadność równoczesnego stosowania tych metod podczas doboru polimerów i ich dawek. Testy zlewkowe umożliwiają szybką ocenę właściwości flokulacyjnych oraz ograniczenie liczby preparatów kierowanych do dalszych badań, natomiast CSK i OWF pozwalają na ocenę podatności osadów na odwadnianie. Połączenie obu podejść umożliwia bardziej kompleksową ocenę skuteczności kondycjonowania niż zastosowanie pojedynczego wskaźnika. Szczególnie istotny jest fakt, że testy zlewkowe pozwoliły na wytypowanie polielektrolitu, dla którego wartości CSK i OWF należały do najniższych spośród badanych preparatów. Oznacza to, że metoda ta może stanowić szybkie i skuteczne narzędzie wstępnej preselekcji polimerów wykorzystywanych w oczyszczalniach ścieków, ograniczając liczbę czasochłonnnych i kosztownych analiz laboratoryjnych. Jednak ostateczny wybór rodzaju i dawki polimeru powinien być każdorazowo potwierdzany pomiarami CSK i OWF, zwłaszcza gdy różnice pomiędzy wynikami testów zlewkowych są niewielkie.

6. Wnioski

Polielektrolity wpływają na podatność na odwadnianie osadów ściekowych, czego potwierdzeniem były uzyskane wartości czasu ssania kapilarnego oraz oporu właściwego filtracji.

Testy zlewkowe umożliwiają wstępną selekcję polielektrolitów, co może wpływać na ograniczenie liczby próbek w badaniach laboratoryjnych.

Dla badanego osadu dobrano rodzaj polielektrolitu oraz jego dawki. Optymalny zakres dawkowania wynosił od 11 do 13 ml, przy czym poszczególne metody oznaczania podatności na odwadnianie osadów ściekowych wskazywały na odmienne wartości optymalne.

Testy zlewkowe stanowią użyteczne narzędzie wspomagające dobór polimerów stosowanych do odwadniania osadów ściekowych, jednak ostateczny wybór rodzaju i dawki polimeru powinien być potwierdzony metodami, takimi jak CSK lub OWF.

7. Literatura

- [1] AbuSeif, A., AbuSeif, Y., Gan, S., Alhijawi, Y., Shima, Z., Rehman, Z. U., Ali, M., & Zheng, C. (2026). Low-dose flocculant strategies for sewage sludge dewatering: mechanistic and techno-economic assessment of cationic polyacrylamide and aluminum sulfate. *Chemical Engineering Science*, 330, 123835. <https://doi.org/10.1016/j.ces.2026.123835>
- [2] Cao, X., Wang, F., & Yang, J. (2023). Using a combination of different conditioners to promote dewatering of digested sludge: Rheological characteristics. *Environmental Research*, 237(Pt 2), 116958. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2023.116958>
- [3] Chen, Y., Chio, C., Boteju, R., Lu, G., Dang, Q., & Qin, W. (2026). Sludge dewatering: A review of conventional methods and microbial assisted approaches. *Journal of Environmental Management*, 405, 129776. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2026.129776>
- [4] Eurostat. (2026). Sewage sludge production and disposal [Data set]. https://doi.org/10.2908/ENV_WW_SPD
- [5] Głodniok, M., & Zdebik, D. (2016). Study of the digested sludge dewatering effectiveness using polyelectrolyte gel based on organic polymers. *Journal of Ecological Engineering*, 46, 100–108. <https://doi.org/10.12912/23920629/61471>
- [6] Górka, J. (2020). Kondycjonowanie osadów ściekowych osadami z uzdatniania wody. *Przemysł Chemiczny*, 99(9), 1315–1317. <https://doi.org/10.15199/62.2020.9.9>
- [7] Górka, J., Cimochoń-Rybicka, M., & Poproch, D. (2022). Sludge Management at the Kraków-Płaszów WWTP—Case Study. *Sustainability*, 14(13), 7982. <https://doi.org/10.3390/su14137982>
- [8] Gray, N. F. (2015). Capillary suction time (CST). In S. Tarleton (Ed.), *Progress in filtration and separation* (pp. 659–670). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/C2009-0-64471-8>
- [9] Yuan, H., Gu, L., Cao, X., & Zhu, N. (2026). EPS-Mediated Sludge Dewatering: Molecular structure and interfacial behavior. *Biotechnology*, 458, 135079. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2026.135079>
- [10] Kim, K. S., Sajjad, M., Lee, J., Park, J., & Jun, T. (2013). Variation of extracellular polymeric substances (EPS) and specific resistance to filtration in sludge granulation process to the change of influent organic loading rate. *Desalination and Water Treatment*, 52(22–24), 4376–4387. <https://doi.org/10.1080/19443994.2013.801795>
- [11] Lan, M., Dun, Z., Li, S., Yang, P., & Meng, W. (2026). Mechanism study on free radicals degrading extracellular polymers to enhance sludge dewatering performance. *Journal of Water Process Engineering*, 87, 110047. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2026.110047>
- [12] Lee, C. (2000). Enhanced sludge dewatering by dual polyelectrolytes conditioning. *Water Research*, 34(18), 4430–4436. [https://doi.org/10.1016/S0043-1354\(00\)00209-8](https://doi.org/10.1016/S0043-1354(00)00209-8)
- [13] To, V. H. P., Nguyen, T. V., Vigneswaran, S., & Ngo, H. H. (2016). A review on sludge dewatering indices. *Water Science & Technology*, 74(1), 1–16. <https://doi.org/10.2166/wst.2016.102>
- [14] Qi, Y., Thapa, K. B., & Hoadley, A. F. (2011). Application of filtration aids for improving sludge dewatering properties – A review. *Chemical Engineering Journal*, 171(2), 373–384. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2011.04.060>
- [15] Wadiak, B., Masłoń, A., & Czarnota, J. (2024). Problematyka odcieków z odwadniania osadów prefermentowanych. *Technologia Wody*, 4(86), 44–51
- [16] Zhou, K., Stüber, J., Schubert, R., Kabbe, C., & Barjenbruch, M. (2017). Full-scale performance of selected starch-based biodegradable polymers in sludge dewatering and recommendation for applications. *Water Science & Technology*, 77(1), 7–16. <https://doi.org/10.2166/wst.2017.476>

Czas gazu i ropy jeszcze się nie skończył

Polski Kongres Naftowy i Gazowniczy



Partnerem publikacji jest ORLEN S.A. Zespół Oddziałów Upstream Polska

Czy węglowodory przez kolejne dekady pozostaną ważnym surowcem dla przemysłu? Czy gaz i ropa będą zabezpieczać system energetyczny, zanim nowe technologie i atom na dobre zdominują rynki? Jak bardzo zależne są od nich inne branże i w jaki sposób mogą wykorzystać je, by budować silniejszą gospodarkę Polski i regionu? Na te i inne pytania odpowiedzi szukać będą eksperci i przedstawiciele biznesu podczas październikowego Polskiego Kongresu Naftowego i Gazowniczego.

Transformacja energetyczna to długotrwały proces, nie da się jej wykonać skokowo, przepinając gospodarkę do nowego, niskoemisyjnego systemu. Biznes i społeczeństwo nieustannie potrzebują energii i surowców, dlatego proces ten musi przebiegać ewolucyjnie. Z drugiej strony zyski z tradycyjnych obszarów działalności firm z szeroko rozumianego sektora energii służą temu, by zrealizować kapitałochłonną transformację branży. To też zaawansowane technologie, które choć stworzone na potrzeby wydobycia ropy i gazu ziemnego, sprawdzają się w projektach związanych z morską energetyką wiatrową czy energetyką jądrową.

W październiku w Warszawie odbędzie się Polski Kongres Naftowy i Gazowniczy (www.polishoilandgas.com), organizowany przez ORLEN pod hasłem „Powering the future”. Wydarzenie zgromadzi międzynarodowych ekspertów i analityków, biznesowych praktyków oraz przedstawicieli nauki i administracji, którzy dyskutować będą m.in. o znaczeniu ropy i gazu w transformacji energetycznej, zabezpieczeniu dostępu regionu do złóż surowców oraz kompetencjach, jakie polskie przedsiębiorstwa mogą zdobywać dzięki udziałowi w globalnym rynku ropy i gazu. To ważna dyskusja dla całej gospodarki.

Energia to klucz do bezpieczeństwa i rozwoju

W realiach Europy Środkowej, gdzie odnawialne źródła energii ze względu na uwarunkowania geograficzne mogą pokryć od dwóch trzecich do trzech czwartych zapotrzebowania na energię, błękitne paliwo pozostaje stabilizatorem systemu. Dostęp do gazu i ropy jest dziś gwarantem bezpieczeństwa kraju i warunkiem stabilnego funkcjonowania gospodarki. O kluczowym znaczeniu nieprzerwanych dostaw dobitnie przekonały nas kryzysy ostatnich lat – od pandemii i wojny w Ukrainie po napięcia na Bliskim Wschodzie, które sparaliżowały globalne łańcuchy dostaw.

Perspektywa intensywnego wykorzystania gazu rozciąga się na co najmniej dwie kolejne dekady. Stabilizowanie systemów energetycznych za pomocą paliw gazowych jest koniecznością do czasu pełnego wdrożenia wielkoskalowych, stabilnych źródeł niskoemisyjnych, takich jak energetyka jądrowa. Równolegle utrzymuje się popyt na ropę, który wymusza na sektorze inwestycje w rozwój bazy surowcowej oraz wdrażanie jak najefektywniejszych metod jej przetwarzania.

Energii będzie potrzeba coraz więcej

Globalne zapotrzebowanie na energię elektryczną będzie rosło, głównie ze względu na rozwój energochłonnych technologii cyfrowych, postępującą reindustrializację wielu regionów świata oraz skokowe zwiększenie zużycia energii w krajach rozwijających się. Zanim nowoczesne, zeroemisyjne technologie na dobre zdominują rynki, niezbędny będzie okres przejściowy. W tym czasie kluczową rolę odegrają paliwa tradycyjne, ze szczególnym uwzględnieniem gazu ziemnego, który stanowi bezpieczny pomost między emisyjnym węglem a czystą energią.

Raport World Energy Outlook 2025 Międzynarodowej Agencji Energetycznej w jednym z zaprezentowanych scenariuszy — „Current Policies” — opisującym rzeczywistość opartą na politykach faktycznie realizowanych, a nie zapowiadanych, wskazuje, że zapotrzebowanie na ropę i gaz utrzyma się na wysokim poziomie do połowy stulecia, a oba surowce pozostaną istotną częścią światowego miksu energetycznego.

Gaz ziemny trafia do przemysłu, gospodarstw domowych, energetyki. To podstawa funkcjonowania wielu elektrociepłowni, petrochemii czy przemysłu nawozowego. Szczególnie istotna jest perspektywa dla branży ciepłowniczej, ze względu na duże znaczenie węgla w jej zasilaniu. Ropa naftowa stanowi z kolei podstawę przemysłu paliwowego, produkcji tworzyw sztucznych, a co za tym idzie — większości gospodarki. Odwracając obecną perspektywę, można powiedzieć, że to surowce zbyt cenne, by je spalać, często bez racjonalnego zamiennika.

Regionalny hub gazowy

ORLEN nie tylko rozwija produkcję węglowodorów, dążąc do realizacji strategicznego celu zwiększenia własnego wydobycia błękitnego paliwa w kraju i za granicą do 12 mld m sześć. rocznie, ale prowadzi też handel gazem i ropą. Koncern wykorzystuje terminal LNG w Świnoujściu, którego przepustowość wynosi 8,3 mld m sześć. rocznie. Niebawem możliwości importowe Polski wzrosną dzięki planowanemu terminalowi pływającemu FSRU w rejonie Gdańska. Jednostka ta, z której również będzie korzystał ORLEN, umożliwi odbiór co najmniej 6,1 mld m sześć. gazu rocznie. Dodatkowo polski koncern elastycznie dysponuje mocami regazyfikacyjnymi w zagranicznych terminalach, w litewskiej Kłajpedzie oraz we francuskim Montoir. Dla zapewnienia niezależności logistycznej i wzmocnienia swojej pozycji na globalnym rynku koncern wyczerterował flotę ośmiu nowoczesnych metanowców. Statki te mogą jednorazowo przewieźć około 70 tys. ton skroplonego gazu, co po regazyfikacji daje niemal 100 mln m sześć. surowca.

ORLEN jest kluczowym graczem na rynku Europy Środkowo-Wschodniej. Skala działalności polskiego koncernu, nowoczesna infrastruktura przesyłowa oraz strategiczne połączenia z sąsiednimi państwami tworzą idealne warunki do tego, aby nasz kraj

pełnił funkcję hubu gazowego, wzmacniając stabilność energetyczną tej części kontynentu. Polska, a szerzej — nasz region — nadal poszukuje sposobu na wykorzystanie swoich możliwości w zakresie rozwoju biogazowni, technologii związanych z wychwytem i zatłaczaniem dwutlenku węgla czy też budowy pozycji na rynku gospodarki wodorowej. Ta przyszłość nie nadejdzie, jeżeli nie uda się jej sfinansować, ale też jeśli nie zostaną wykorzystane kompetencje i technologie, które dzisiaj stosujemy na potrzeby branży naftowo-gazowniczej.

Debata o przyszłości ropy i gazu

Dzisiaj niezbędna jest szeroka dyskusja o przyszłości sektora naftowo-gazowego. Polski Kongres Naftowy i Gazowniczy jest przestrzenią do rozmowy o wyzwaniach stojących przed polskim i regionalnym przemysłem i energetyką. Choć 21-22 października w Warszawie ropa naftowa i gaz ziemny będą osią rozmów, dyskusje wyjdą daleko poza rolę tych węglowodorów. Wielobiegunowy świat, zakłócenia w łańcuchach dostaw, trendy związane z reindustrializacją Europy i narastające wyzwania geopolityczne zmuszające do zmiany podejścia do źródeł energii i surowców przemysłowych — to tematy, o których rozmawiać będą liderzy biznesu, decydenci, środowisko akademickie i czołowi analitycy. Uczestnicy wydarzenia skoncentrują się na kluczowych trendach kształtujących nie tylko branżę naftowo-gazowniczą, ale również szeroko pojętą energetykę i nowoczesny

przemysł. Rozmowy mają także objąć tematykę sztucznej inteligencji w przemyśle. Branża naftowo-gazownicza wykorzystuje ją od lat, a jej zaawansowanie w tym względzie można przekładać na inne obszary gospodarki.

Gros rozmów dotyczyć będzie nowych technologii, w tym roli sztucznej inteligencji, uczenia maszynowego i zaawansowanych rozwiązań wspierających operacje w sektorze naftowym i gazowniczym — temu poświęcone będą m.in. towarzyszące Kongresowi wydarzenia partnerskie. Jego integralną częścią będzie Young Professionals Forum. To specjalna platforma poświęcona innowacjom, perspektywom oraz nowym kierunkom rozwoju sektora, kierowana do młodych inżynierów, specjalistów od cyfryzacji, ale też lokalnych liderów. Ważnym punktem dyskusji będzie też komponent krajowy, czyli rozbudowa i wzmacnianie potencjału rodzimych firm, a także ich funkcjonowanie jako nowoczesnego motoru rozwoju zorientowanego na konsumenta.

Transformacja energetyki postępuje za sprawą ORLENU, który inwestuje w fotowoltaikę, buduje morskie farmy wiatrowe, rozwija segment wodorowy. Stabilna i bezpieczna przyszłość wymaga jednak pragmatyzmu i konstruktywnego dialogu. Współczesny świat, poturbowany przez kryzysy geopolityczne, konflikty zbrojne i zerwane łańcuchy dostaw, zweryfikował plany natychmiastowego odejścia od paliw kopalnych. Do czasu pełnego wdrożenia stabilnych, wielkoskalowych technologii niskoemisyjnych, w tym energetyki jądrowej, tradycyjne surowce będą stanowiły zabezpieczenie systemów energetycznych.

POLSKI KONGRES NAFTOWY I GAZOWNICZY

POWERING THE FUTURE

 21-22.10.2026

 Muzeum Historii Polski w Warszawie

Dołącz do ekspertów i liderów rynku.

Porozmawiajmy o tym, co dalej z energetyką, przemysłem, surowcami i bezpieczeństwem.



Nowoczesne metody bezinwazyjnej diagnostyki nielegalnych połączeń elektrycznych w kontekście bezpieczeństwa instalacji gazowych i sanitarnych

Modern non-invasive diagnostic methods for detecting unauthorized electrical connections in the context of gas and sanitary installation safety

Witold Paleczek^{1*} 

¹ Wydział Budownictwa, Politechnika Częstochowska

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

Streszczenie:

Prezentowano bezinwazyjne metody wykrywania nielegalnych połączeń elektrycznych (NPE) w instalacjach prowadzonych w przestrzeniach technicznych. Omówiono metody falowe TDR/FDR, sygnałowe, impedancyjne, harmoniczne, dynamiczne, czasowe i termograficzne, wskazując ich komplementarność oraz znaczenie dla bezpieczeństwa instalacji gazowych i sanitarnych. Zaproponowano metodologię badań in situ. Wykazano, że najwyższą skuteczność zapewnia łączenie metod falowych, sygnałowych, impedancyjnych i czasowych.

Słowa kluczowe: reflektometria, TDR, FDR, diagnostyka bezinwazyjna

Abstract:

Non-invasive methods for detecting unauthorized electrical connections (NPE) in wiring systems located in technical spaces are presented. Wave-based TDR/FDR, signal-based, impedance, harmonic, dynamic, time-domain and thermographic techniques are discussed, highlighting their complementarity and relevance to the safety of gas and sanitary installations sharing space with electrical wiring. An in situ diagnostic methodology is proposed. It is shown that the highest effectiveness is achieved by combining wave, signal, impedance and time-domain methods.

Keywords: reflectometry, TDR, FDR, non-invasive diagnostics

1. Wprowadzenie techniczne

Nielegalne połączenia elektryczne stanowią zagrożenie nie tylko dla użytkowników instalacji elektrycznych, lecz także dla bezpieczeństwa instalacji gazowych, wodnych i sanitarnych. Współczesne budynki są systemami zintegrowanymi: przewody, rury, piony i przestrzenie instalacyjne współdzielą tę samą infrastrukturę. Dlatego ingerencja w jedną instalację może wpływać na pozostałe. Nielegalne połączenia elektryczne mogą prowadzić do lokalnych wzrostów temperatury przewodów w sąsiedztwie rur gazowych, przeciążeń i asymetrii obciążeń, kontaktu przewodów prowadzonych bez zachowania minimalnych odległości z instalacjami wodnymi lub sanitarnymi, zaburzeń uziemienia i przyspieszonej korozji elektrochemicznej elementów metalowych. Dlatego problem nielegalnych połączeń nie jest wyłącznie kwestią „rachunków” – jest to także problem bezpieczeństwa budynków.

Instalacje elektryczne w budynkach wielorodzinnych i jednorod-

zinnych mają cechy sprzyjające powstawaniu nielegalnych połączeń: wspólne piony i przestrzenie instalacyjne, bliskość lokali, łatwy dostęp do przewodów za licznikami, wieloletnie modernizacje wykonywane przez różnych wykonawców, brak dokumentacji powykonawczej oraz różne standardy instalacji w obrębie jednego budynku. W wielu starszych budynkach przewody prowadzone są w ścianach działowych, sufitach podwieszanych, piwnicach, garażach oraz w przestrzeniach instalacyjnych sanitarnych. To właśnie te miejsca są najczęściej wykorzystywane do tworzenia połączeń pasożytniczych.

Dlaczego nielegalne połączenia są trudne do wykrycia? Ponieważ tradycyjne metody diagnostyczne – takie jak pomiar prądu cęgami, kontrola plomb, oględziny tablicy licznikowej czy pomiar napięcia w gniazdach – nie wykrywają: przewodów podłączonych za licznikiem, krótkich odcinków 2–3 metrów, połączeń w przestrzeniach instalacyjnych sanitarnych, poboru okazjonalnego, poboru zsynchronizowanego z rytmem dnia, poboru nocnego lub maskowanego.

Współczesna diagnostyka korzysta z metod, które analizują sygnały w przewodach, wysyłają impulsy testowe, badają odpowiedź częstotliwościową, mierzą impedancję oraz analizują harmoniczne generowane przez urządzenia. Metody te: nie wymagają kucia ścian, nie wymagają demontażu instalacji, nie wymagają wyłączania zasilania, są bezpieczne dla instalacji gazowych i sanitarnych, pozwalają wykryć nawet bardzo krótkie odcinki przewodów, pozwalają wykryć podłączenia ukryte.

2. Cel artykułu

Celem artykułu jest przedstawienie nowoczesnych metod wykrywania nielegalnych podłączeń elektrycznych, pokazanie ich praktycznej skuteczności, wyjaśnienie ich bezpieczeństwa dla instalacji gazowych i sanitarnych oraz zaprezentowanie modelowych przypadków uzasadniających ich stosowanie. W niniejszej pracy termin „pajęczarstwo” odnosi się do nieautoryzowanych, pasożytniczych odgałęzień przewodów lub instalacji elektrycznych, wprowadzonych w pionach, kanałach lub szybach instalacyjnych, powodujących lokalne zmiany impedancji oraz zaburzenia propagacji sygnałów diagnostycznych.

Pomimo szerokiego zakresu badań nad diagnostyką instalacji elektrycznych, w literaturze brakuje prac dotyczących wykrywania nielegalnych podłączeń elektrycznych w budynkach z wykorzystaniem zwłaszcza metod falowych (TDR/FDR) w kontekście bezpieczeństwa instalacji gazowych i sanitarnych. Niniejszy artykuł wypełnia tę lukę, prezentując interdyscyplinarne podejście łączące metody falowe, sygnałowe i impedancyjne.

3. Przegląd literatury przedmiotu

Diagnostyka instalacji elektrycznych w budynkach – szczególnie w kontekście nielegalnych podłączeń oraz ich wpływu na bezpieczeństwo instalacji gazowych i sanitarnych – obejmuje szeroki zakres metod pomiarowych. W literaturze dominują prace dotyczące reflektometrii impulsowej TDR (Time Domain Reflectometry) i częstotliwościowej FDR (Frequency Domain Reflectometry), technik sygnałowych i impedancyjnych, termografii oraz analizy profilu mocy. Poniżej przedstawiono syntetyczny przegląd badań istotnych dla diagnostyki przewodów prowadzonych w pionach, kanałach i przestrzeniach instalacyjnych, które są miejscem potencjalnych „odgałęzień pasożytniczych”.

Reflektometria w dziedzinie czasu (TDR) jest jedną z najbardziej niezawodnych metod lokalizacji nieciągłości, odgałęzień i zmian impedancji w przewodach. Podstawy teoretyczne i konstrukcyjne przedstawia Baker (2010) [2], natomiast klasyczne ujęcie reflektometrii opisuje nota aplikacyjna Hewlett Packard (1993) [11]. Zastosowania TDR w diagnostyce kabli i infrastruktury elektroenergetycznej omawia Hernandez-Mejia (2016) [10], a znaczenie metody w praktykach przemysłowych podkreśla IEEE Std 141:1993 [12]. W literaturze geotechnicznej TDR wykorzystywana jest do pomiaru wilgotności i właściwości dielektrycznych materiałów (Curioni i in., 2019 [6]), co potwierdza wysoką czułość metody na zmiany przenikalności elektrycznej. Zastosowania analizy widmowej FFT w diagnostyce materiałów porowatych przedstawia praca autora (2005) [18], wskazując na komplementarność metod czasowych i częstotliwościowych. Xu i in. (2012) [23] przedstawili krótką, wieloigłową sondę FDR umożliwiającą precyzyjny pomiar

wilgotności materiałów porowatych, co potwierdza wysoką czułość metod częstotliwościowych na zmiany przenikalności dielektrycznej. Zhu i współautorzy (2019) [24] porównali działanie czujników TDR i FDR w ośrodkach o różnej teksturze, wskazując, że TDR zapewnia wysoką rozdzielczość przestrzenną i stabilność pomiaru, natomiast FDR charakteryzuje się dużą czułością na zmiany wilgotności i przewodności. Najnowsze prace, takie jak Zhu, Alsaman i Huang (2024) [25], rozszerzają zastosowania FDR na pomiary poziomu cieczy i interferometrię mikrofalową, co potwierdza rosnące znaczenie metod częstotliwościowych w nowoczesnych systemach diagnostycznych.

Diagnostyka jakości energii obejmuje **metody sygnałowe i analizę harmonicznych** zapadów, przepięć i zakłóceń. Kompleksowe omówienie metod przetwarzania sygnałów przedstawiają Bollen i Gu (2006) [4]. Normatywne wymagania dotyczące dopuszczalnych poziomów harmonicznych określa IEEE Std 519:2014 [13], a klasyczne podstawy teoretyczne opisują Arrillaga i Watson (2003) [1].

Metody impedancyjne i pomiary pętli zwarcia stanowią podstawę oceny bezpieczeństwa instalacji niskiego napięcia. Zagadnienia uziemień i torów ochronnych omawia IEEE Std 142:2007 [14], natomiast wymagania dotyczące pomiarów impedancji pętli zwarcia określa EN IEC 615573:2023 [7]. Normy te są kluczowe dla oceny jakości połączeń i ryzyka porażeniowego.

Diagnostyka instalacji elektrycznych w budynkach. Normy dotyczące projektowania, prowadzenia i sprawdzania instalacji w budynkach określają m.in. IEC 60364552:2024 [15] oraz PNHD 603646:2016 [21]. Dokumentacja techniczna Fluke 1736/1738 (2026) [9] przedstawia praktyczne aspekty monitorowania jakości energii i rejestracji parametrów pracy instalacji.

Bezpieczeństwo instalacji gazowych i sanitarnych. Instalacje gazowe i wodociągowe, współdzielące przestrzeń instalacyjną z przewodami elektrycznymi, opisują normy PNEN 1775:2009 [19] oraz PNEN 8065:2012 [20]. Standard NFPA 54 (2024) [17] stanowi punkt odniesienia w kontekście międzynarodowym.

Analiza profilu mocy i metody korelacyjne. Metody analizy danych pomiarowych z liczników energii, w tym klasyfikacja profili obciążenia, przedstawione są w pracach Chicco (2012) [5] oraz Beckel i in. (2014) [3]. Techniki te umożliwiają wykrywanie nietypowych poborów energii, w tym obciążeń pasożytniczych.

Termografia w diagnostyce instalacji jest nieinwazyjną metodą wykrywania przegrzewających się elementów instalacji. Podstawy teoretyczne opisują Minkina i Dudzik (2009) [16], a szeroki przegląd zastosowań przedstawiają Usamentiaga i in. (2014) [22]. Praktyczne zastosowania w budynkach i energetyce opisuje przewodnik FLIR Systems (2013) [8].

4. Klasyfikacja nowoczesnych metod wykrywania przyłączy pasożytniczych

Nowoczesna diagnostyka instalacji elektrycznych korzysta z metod, które pozwalają wykryć nawet bardzo krótkie, ukryte lub okazjonalne podłączenia pasożytnicze. Metody te są szczególnie przydatne w diagnostyce przewodów prowadzonych w pionach, kanałach i przestrzeniach instalacyjnych, gdzie najczęściej występują nielegalne odgałęzienia. Poniżej przedstawiono jedenaście najskuteczniejszych metod stosowanych w praktyce inżynierskiej, bezpiecznych dla instalacji gazowych i sanitarnych.

Metoda sygnałowa niskoczęstotliwościowa (0,5–10 kHz). Wprowadzenie do obwodu sygnału testowego o niskiej częstotliwości i analiza jego propagacji. Wykrywa: równoległe odgałęzienia, przewody „wiszące”, podłączenia za licznikiem, krótkie odcinki 1–3 m. Dlaczego skuteczna: sygnał LF „rozlewa się” po instalacji i ujawnia miejsca o zmienionej impedancji. Zastosowanie: szybka diagnostyka starych instalacji, wstępna ocena ciągłości i geometrii obwodów.

Metoda impulsowa TDR (Time Domain Reflectometry). Wyśyłanie krótkiego impulsu i analiza odbić sygnału w czasie. Wykrywa: nieciągłości przewodów, równoległe podłączenia, ingerencje, przewody prowadzone w przestrzeniach instalacyjnych. Dlaczego skuteczna: umożliwia lokalizację miejsca ingerencji z dokładnością do kilkunastu centymetrów. Zastosowanie: instalacje rozgałęzione, piony i kanały instalacyjne.

Metoda częstotliwościowa FDR (Frequency Domain Reflectometry). Wprowadzenie sygnału o zmiennej częstotliwości i analiza odpowiedzi częstotliwościowej instalacji. Wykrywa: zmiany impedancji częstotliwościowej, odgałęzienia, ingerencje pojemnościowe i indukcyjne. Dlaczego skuteczna: bardzo czuła na dyspersję i straty dielektryczne – wykrywa podłączenia „miękkie”, trudne dla TDR. Zastosowanie: przewody w przestrzeniach instalacyjnych sanitarnych, miejsca o dużej wilgotności.

Metoda harmoniczna (analiza widma obciążenia). Każde urządzenie generuje charakterystyczny „odcisk palca” harmonicznym. Wykrywa: obce urządzenia, pobór maskowany, pobór zsynchronizowany z aktywnością użytkownika. Dlaczego skuteczna: pozwala wykryć obciążenia, których właściciel nie używa. Zastosowanie: przypadki poboru okazjonalnego i reaktywnego.

Metoda impedancyjna (pomiar Z w różnych punktach). Pomiar impedancji pętli zwarcia i porównanie z wartościami referencyjnymi. Wykrywa: dodatkowe przewody, równoległe odgałęzienia, zmiany geometrii instalacji. Dlaczego skuteczna: bardzo czuła na lokalne zmiany instalacji. Zastosowanie: instalacje o nieznannej dokumentacji powykonawczej.

Metoda dynamiczna (testy obciążeniowe). Wprowadzenie kontrolowanego obciążenia i obserwacja reakcji instalacji. Wykrywa: pobór okazjonalny, nocny, „wakacyjny”. Dlaczego skuteczna: pozwala wykryć pobór pojawiający się tylko w określonych warunkach. Zastosowanie: nielegalny pobór okazjonalny.

Metoda profilu mocy (analiza dobowych charakterystyk). Analiza zmian poboru w ciągu doby i porównanie z typowymi profilami użytkownika. Wykrywa: pobór „gdy nikogo nie ma”, pobór maskowany pracą urządzeń właściciela. Dlaczego skuteczna: pozwala wykryć anomalie w rytmie dobowym. Zastosowanie: instalacje z licznikami inteligentnymi (licznik inteligentny (AMI) to elektroniczny licznik energii wyposażony w rejestrację profilu mocy w krótkich odstępach czasu, dwukierunkową komunikację, zdalny odczyt, funkcje diagnostyczne oraz mechanizmy wykrywania anomalii i obsługi dynamicznych taryf).

Metoda różnicowa (porównanie dwóch faz lub obwodów). Porównanie poboru między obwodami, które powinny być symetryczne. Wykrywa: asymetrię obciążeń, podłączenia do jednej fazy, pobór „przerzucony” na sąsiada. Dlaczego skuteczna: bardzo szybka diagnostyka. Zastosowanie: budynki wielorodzinne.

Metoda termowizyjna (kamera IR). Wizualizacja temperatury przewodów i złącz. Wykrywa: przegrzewające się przewody, ukryte obciążenia, podłączenia w przestrzeniach instalacyjnych. Dlaczego skuteczna: intuicyjna, wizualna, bezinwazyjna. Zastosowanie: szybka ocena bezpieczeństwa.

Metoda ciągłości i rezystancji przewodów. Pomiar rezystancji przewodów i porównanie z wartościami projektowymi. Wykrywa: przewody równoległe, ingerencje, nienaturalnie niską rezystancję. Dlaczego skuteczna: bardzo dokładna w prostych instalacjach. Zastosowanie: instalacje jednofazowe, krótkie odcinki.

Metoda korelacyjna (analiza zmian poboru w czasie). Korelacja zmian poboru z aktywnością użytkownika. Wykrywa: pobór zsynchronizowany z wejściem do domu, pobór „naśladowczy”. Dlaczego skuteczna: idealna dla przypadków reaktywnych. Zastosowanie: nielegalny pobór zsynchronizowany.

Tabela 1. Porównanie 11 nowoczesnych metod bezinwazyjnego wykrywania w instalacjach elektrycznych podłączeń pasożytniczych, opracowanie własne

Table 1. Comparison of 11 modern non-invasive methods for detecting parasitic electrical connections in power installations, own elaboration

Metoda	Zasada działania	Co wykrywa	Zalety	Ograniczenia
Metoda sygnałowa niskoczęstotliwościowa	Sygnał 0,5–10 kHz i analiza propagacji	Odgałęzienia, przewody „wiszące”, krótkie podłączenia	Bezpieczna, nieinwazyjna	Mniejsza dokładność lokalizacji miejsca podłączenia niż w metodzie TDR
TDR – reflektometria czasu	Impuls testowy i analiza odbić	Miejsce ingerencji, długość przewodu	Najdokładniejsza lokalizacja	Wymaga dostępu do obu końców przewodu lub znajomości topologii obwodu lub odcinka testowanego
FDR – reflektometria częstotliwości	Sygnał o zmiennej częstotliwości	Zmiany impedancji, odgałęzienia	Bardzo czuła na dyspersję	Nie zapewnia precyzyjnej lokalizacji miejsca ingerencji w przewód
Metoda harmoniczna	Analiza widma harmonicznym	Obce urządzenia, pobór maskowany	Wykrywa trudne „inteligentne” podłączenia	Wymaga ciągłej rejestracji widma w czasie
Metoda impedancyjna	Pomiar impedancji pętli	Dodatkowe przewody	Bardzo czuła	Wymaga wiarygodnych wartości referencyjnych impedancji dla porównania
Metoda dynamiczna	Test obciążeniowy	Pobór okazjonalny, nocny	Prosta, tania	Wymaga przeprowadzenia krótkiego testu obciążeniowego instalacji
Metoda profilu mocy	Analiza dobowych zmian poboru	Pobór „gdy nikogo nie ma”	NPE okazjonalny i zsynchronizowany	Wymaga danych pomiarowych z co najmniej kilku kolejnych dni (dłuższe serie danych)
Metoda różnicowa	Porównanie faz/obwodów	Asymetrie, podłączenia do jednej fazy	Bardzo szybka	Nie wykrywa bardzo krótkich odcinków podłączeń pasożytniczych
Metoda termograficzna	Kamera IR	Przegrzewające się przewody	Wizualna, intuicyjna	Nie wykrywa przewodów zimnych
Metoda ciągłości i rezystancji	Pomiar rezystancji	Przewody równoległe	Bardzo dokładna	Ograniczona skuteczność w złożonych, silnie rozgałęzionych instalacjach
Metoda korelacyjna	Korelacja poboru z aktywnością	Pobór reaktywny, zsynchronizowany	NPE zsynchronizowany	Wymaga rejestracji czasowej poboru mocy oraz danych o aktywności odbiorników

Jedenaście metod bezinwazyjnych – sygnałowych, impulsowych, częstotliwościowych, harmonicznych, impedancyjnych, dynamicznych i termograficznych (termowizyjnych) – tworzy kompletny zestaw narzędzi do wykrywania nielegalnego poboru energii elektrycznej. Żadna z nich nie daje pełnego obrazu instalacji. Dopiero ich łączne zastosowanie pozwala wykryć nawet najbardziej „inteligentne” podłączenia, przy zachowaniu pełnego bezpieczeństwa instalacji gazowych i sanitarnych. W tabeli 1 przedstawiono porównanie tych metod – od sygnałowych po dynamiczne – co pokazuje pełne spektrum możliwości diagnostycznych i podkreśla, że skuteczność zapewnia dopiero ich komplementarne wykorzystanie.

5. Przydatność metod TDR i FDR w instalacjach elektrycznych i inspekcjach sanitarnych

Przydatność metod TDR i FDR nie ogranicza się wyłącznie do wykrywania odgałęzień pasożytniczych w instalacjach elektrycznych. W literaturze oraz praktyce inżynierskiej podkreśla się rosnące znaczenie reflektometrii falowej w analizach i inspekcjach sanitarnych, szczególnie w przestrzeniach, w których przewody elektryczne współdzielą kanały z instalacjami gazowymi i wodociągowymi. Metalowe rury gazowe i wodociągowe stanowią naturalne reflektory falowe, generując wyraźne odbicia impulsów TDR, natomiast przepływająca ciecz – będąca elektrolitem o wysokiej przenikalności dielektrycznej ($\epsilon_r \approx 80$) – powoduje charakterystyczne zmiany widma częstotliwościowego łatwo wykrywalne metodą FDR. W instalacjach sanitarnych wysoki kontrast dielektryczny pomiędzy suchym środowiskiem otaczającym przewód sensoryczny a medium roboczym rurociągu sprzyja powstawaniu lokalnych zmian impedancji falowej, które umożliwiają natychmiastową identyfikację oraz precyzyjną lokalizację geometryczną punktu awarii na podstawie analizy czasu powrotu sygnału odbitego. Dzięki obecności ciągłych połączeń metalicznych oraz przewodzących cieczy, metody falowe pozwalają wykrywać nie tylko nieautoryzowane podłączenia elektryczne, lecz także nieszczelności, kondensację, korozję oraz miejsca kontaktu przewodów z elementami instalacji gazowych i wodo-

ciągowych. W tabeli 2 przedstawiono porównanie obu tych metod diagnostycznych.

Wniosek techniczny: TDR lokalizuje miejsce ingerencji, FDR wykrywa jej charakter – razem tworzą kompletną diagnostykę falową zarówno dla instalacji elektrycznych, jak i dla gazowych, wodnych oraz sanitarnych.

5.1. Proponowana sekwencja działań w procedurze diagnostycznej

W literaturze i praktyce inżynierskiej zaleca się następującą procedurę diagnostyczną:

- rejestracja sygnałów metodami TDR, FDR, LF oraz analizy harmonicznych,
- analiza zmian impedancji i charakterystyk częstotliwościowych,
- rejestracja profilu mocy w cyklu 24–72 h (dla metod czasowych),
- analiza korelacyjna poboru energii z aktywnością użytkownika,
- weryfikacja termograficzna przewodów i złącz,
- porównanie wyników z danymi projektowymi.

Procedura ta jest zgodna z podejściem stosowanym w diagnostyce kabli, instalacji budynkowych i systemów dystrybucyjnych.

Literatura wskazuje, że **TDR** skutecznie lokalizuje odgałęzienia $\geq 1,5$ m z dokładnością centymetrową, a **FDR** wykrywa również odgałęzienia „miękkie” (pojemnościowe). W środowiskach wilgotnych **FDR przewyższa TDR** pod względem czułości.

Metody sygnałowe (LF – Low Frequency) wykrywają odgałęzienia 1–3 m, są „odporne” na brak dokumentacji instalacji, nie lokalizują miejsca ingerencji.

Analiza harmonicznych pozwala wykryć obce urządzenia: analiza harmonicznych pozwala wykryć obce urządzenia, ponieważ każdy odbiornik generuje charakterystyczny „podpis widmowy” – unikalny zestaw amplitud i częstotliwości harmonicznych, wynikający z jego konstrukcji i sposobu pracy. Ten widmowy „odcisk palca” jest powtarzalny i odróżnia jedno urządzenie od drugiego, dzięki czemu jego obecność można wykryć nawet wtedy, gdy po-

Tabela 2. Porównanie metod TDR i FDR oraz ich zastosowań w diagnostyce instalacji elektrycznych i sanitarnych, opracowanie własne
Table 2. Comparison of TDR and FDR Methods and Their Applications in the Diagnostics of Electrical and Sanitary Installations, own elaboration

Metoda	Zalety	Wady / Ograniczenia	Zastosowania
TDR	Dokładna lokalizacja miejsca ingerencji; odporność na zakłócenia; szybka diagnostyka; skuteczna dla połączeń rezystancyjnych; możliwość określenia długości przewodu; prosta interpretacja odbić	Wymaga dostępu do końców przewodu; słaba czułość na podłączenia pojemnościowe i indukcyjne; nakładanie odbić w instalacjach rozgałęzionych; konieczność znajomości przenikalności (ϵ_r); brak czułości na subtelne zmiany impedancji częstotliwościowej	Instalacje elektryczne: lokalizacja odgałęzień pasożytniczych, przewodów „wiszących”, punktów kontaktu z konstrukcją. Instalacje gazowe i wodne: metalowe rury jako naturalne reflektory falowe; lokalizacja miejsc styku przewodów z rurociągami; wykrywanie nieszczelności i korozji poprzez zmiany odbić; diagnostyka kanałów technicznych o wspólnej zabudowie.
FDR	Wysoka czułość na dyspersję i straty; wykrywa podłączenia pojemnościowe i indukcyjne; skuteczna w instalacjach długich; dobra w środowiskach o zmiennej wilgotności; ujawnia ingerencje niewidoczne dla TDR; pozwala określić charakter ingerencji	Brak lokalizacji miejsca ingerencji; wymaga analizy widmowej; czułość zależna od jakości sygnału; konieczność kalibracji dla długich przewodów; interpretacja bardziej złożona niż w TDR	Instalacje elektryczne: wykrywanie subtelnych zmian impedancji, połączeń pojemnościowych i indukcyjnych, przewodów w wilgotnych kanałach. Instalacje sanitarne: ciecz o wysokiej przenikalności ($\epsilon_r \approx 80$) jako medium o silnym kontraście dielektrycznym; wykrywanie kondensacji, korozji, zawilgoceń, zmian widma częstotliwościowego; analiza rurociągów wodnych i miejsc o podwyższonej wilgotności.

bór jest maskowany lub chwilowy. Metoda jest szczególnie skuteczna przy poborze 'okazjonalnym' i zsynchronizowanym.

Metody impedancyjne są bardzo czułe na zmiany geometrii instalacji: metody impedancyjne są bardzo czułe na zmiany geometrii instalacji, ponieważ każda ingerencja w układ przewodów – zmiana długości, przekroju, dodanie odgałęzienia lub równoległego przewodu – powoduje mierzalną zmianę impedancji. Dzięki temu nawet niewielkie podłączenia pasożytnicze mogą zostać wykryte. Wymagają wartości referencyjnych: metody impedancyjne są bardzo czułe na zmiany geometrii instalacji, ale aby wykryć dodatkowy przewód lub odgałęzienie, muszą porównać aktualną impedancję z wartością referencyjną – czyli znaną wcześniej, prawidłową impedancją danego obwodu. Bez takiego punktu odniesienia metoda nie może jednoznacznie wskazać ingerencji.

Metody dynamiczne i profil mocy wykrywają pobór „okazjonalny” i zsynchronizowany, a profil mocy ujawnia anomalie w cyklu dobowym.

Termografia wykrywa przewody przeciążone i aktywne podłączenia. Nie wykrywa przewodów nieobciążonych.

6. Dyskusja nad zastosowaniem praktycznym omówionych metod

Komplementarność metod w literaturze jest podkreślana jako najwyższa skuteczność, czyli łączenie: TDR + FDR (geometria i impedancja), LF + impedancja (sygnał i struktura), profil mocy + korelacja (czas i zachowanie użytkownika). Znaczenie dla bezpieczeństwa instalacji gazowych i sanitarnych znajdujemy w badaniach, które wskazują, że odgałęzienia pasożytnicze mogą powodować wzrost temperatury przewodów, ryzyko kontaktu z rurami wodnymi oraz lokalne zmiany potencjału sprzyjające korozji.

Omówione metody są rekomendowane dla administratorów budynków, elektryków i służb technicznych, firm audytowych i kontrolnych, organów nadzoru, Urzędu Dozoru Technicznego. Metody te są bezinwazyjne i nie wymagają wyłączenia zasilania. Ich łączne wykorzystanie pozwala na kompleksową ocenę instalacji, zwiększa bezpieczeństwo użytkowników oraz minimalizuje ryzyko nieautoryzowanych ingerencji.

7. Wnioski podsumowujące

Na podstawie literatury oraz badań własnych można sformułować następujące wnioski:

Nielegalne podłączenia elektryczne oraz odgałęzienia pasożytnicze stanowią realne zagrożenie nie tylko dla instalacji elektrycznych, lecz także dla bezpieczeństwa instalacji gazowych, wodnych i sanitarnych. Współdzielenie przestrzeni instalacyjnych sprawia, że lokalne zmiany impedancji, przeciążenia przewodów oraz niekontrolowane trasy kablowe mogą wpływać na temperaturę, korozję elektrochemiczną i integralność innych instalacji.

Literatura jednoznacznie wskazuje, że tradycyjne metody diagnostyczne (oględziny, pomiary napięcia, kontrola plomb, pomiary cęgowce) są niewystarczające do wykrywania krótkich, ukrytych lub „okazjonalnych” podłączeń. Szczególnie trudne do

identyfikacji są odgałęzienia o długości 1–3 m oraz pobór zsynchronizowany z aktywnością użytkownika.

Najwyższą skuteczność diagnostyczną zapewniają metody falowe (TDR i FDR), umożliwiające wykrycie i charakterystykę odgałęzień pasożytniczych poprzez analizę odbić impulsowych oraz odpowiedzi częstotliwościowej. FDR wykazuje szczególną czułość w środowiskach o zmiennej przenikalności elektrycznej, takich jak piony sanitarne czy miejsca podwyższonej wilgotności.

Metody sygnałowe niskoczęstotliwościowe (LF) oraz pomiary impedancyjne stanowią skuteczne uzupełnienie metod falowych, umożliwiając wykrycie zmian geometrii instalacji, przewodów „wiszących” oraz odgałęzień o charakterze rezystancyjnym lub pojemnościowym.

Metody czasowe – analiza profilu mocy i analiza korelacyjna – są kluczowe w przypadkach poboru „okazjonalnego” i zsynchronizowanego z rytmem dnia użytkownika. Umożliwiają wykrycie anomalii niewidocznych w pomiarach strukturalnych.

Termografia IR stanowi wartościowe narzędzie wspomagające, pozwalające na wizualizację przegrzewających się przewodów i złącz, szczególnie w miejscach trudno dostępnych. Nie zastępuje jednak metod falowych ani sygnałowych.

Najwyższą skuteczność diagnostyczną uzyskuje się poprzez łączenie metod falowych, sygnałowych, impedancyjnych i czasowych. Wynika to z wielowymiarowego charakteru nielegalnych podłączeń elektrycznych, obejmującego aspekty geometryczne, impedancyjne, energetyczne i czasowe.

Zastosowanie metod bezinwazyjnych jest w pełni bezpieczne dla instalacji gazowych i sanitarnych, ponieważ nie wymaga ingerencji w strukturę budynku, nie wymaga wyłączenia zasilania i nie powoduje obciążeń przekraczających parametry eksploatacyjne. Sygnały diagnostyczne mają bardzo małą energię i nie wpływają na pracę instalacji gazowych ani wodnych.

Proponowana metodyka może być stosowana przez administratorów budynków, elektryków, służby techniczne oraz organy nadzoru, stanowiąc praktyczne narzędzie do oceny bezpieczeństwa instalacji oraz identyfikacji nieautoryzowanych przyłączy.

Wyniki przeglądu literatury wskazują na potrzebę dalszych badań nad integracją metod falowych z analizą profilu mocy oraz nad automatyzacją detekcji nielegalnych podłączeń elektrycznych, szczególnie w budynkach wielorodzinnych i obiektach o złożonej infrastrukturze instalacyjnej.

8. Podziękowania

Artykuł ten dedykuję moim Profesorom: śp. Kazimierzowi Kloisiowi (klasa fortepianu) oraz śp. Profesorom Joachimowi Grubichowi i Janowi Jargoniowi (klasa organów klasycznych). Ich życzliwość, wymagająca opieka oraz mistrzostwo wykonawcze ukształtowały moją intuicję harmonii i struktury w muzyce, stając się dla mnie źródłem trwałej inspiracji. Pierwszy recital organowy na Skałce w Krakowie, do którego mnie zachęcili, został dodatkowo umożliwiony dzięki życzliwej zgodzie śp. Ojca Dyrektora, Profesora Zachariasza Jabłońskiego – Człowieka wielkiej dobroci, który otworzył przede mną przestrzeń twórczej swobody i zaufania. Wydarzenie to stało się drogą łączącą refleksję muzyczną z inżynierskomatematyczną – drogą, w której zjawiska akustyczne, takie jak pogłos, rezonans i złożoność widma,

odnajdują swoje odpowiedniki w modelach wielowymiarowych przestrzeni metrycznych i ich algorytmach. Profesorom dziękuję za światło, które wnieśli w moje myślenie i pracę twórczą, oraz za to, że pamięć o Nich pozostaje dla mnie nieustannym źródłem wdzięczności. Z szacunkiem i pokorą przyjmuję naturalny dar możliwości przeżywania tego, co jest w rzeczywistości najczystsze: wdzięczności, piękna i dobra.

9. Literatura

- [1] Arrillaga, J., & Watson, N. R. (2003). *Power system harmonics*. John Wiley & Sons. <https://doi.org/10.1002/0470871229>
- [2] Baker, R. J. (2010). CMOS: Circuit design, layout, and simulation (2nd ed.). Wiley/IEEE Press. <https://doi.org/10.1002/9780470891179>
- [3] Beckel, C., Sadamori, L., Staake, T., & Santini, S. (2014). Revealing household characteristics from smart meter data. *Energy*, 78, 397–410. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2014.10.025>
- [4] Bollen, M. H. J., & Gu, I. Y. H. (2006). *Signal processing of power quality disturbances*. Wiley-IEEE Press. <https://doi.org/10.1002/0471931314>
- [5] Chicco, G. (2012). Overview and performance assessment of the clustering methods for electrical load pattern grouping. *Energy*, 42(1), 68–80. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2011.12.031>
- [6] Curioni, G., Chapman, D. N., Royal, A. C. D., Metje, N., Dashwood, B., Gunn, D. A., Inauen, C. M., Chambers, J. E., Meldrum, P. I., Wilkinson, P. B., Swift, R. T., & Reeves, H. J. (2019). Time domain reflectometry (TDR) potential for soil condition monitoring of geotechnical assets. *Canadian Geotechnical Journal*, 56(7), 942–955. <https://doi.org/10.1139/cgj-2017-0618>
- [7] European Committee for Electrotechnical Standardization. (2023). EN IEC 615573:2023. *Electrical safety in low voltage distribution systems up to 1 000 V a.c. and 1 500 V d.c. – Equipment for testing, measuring or monitoring of protective measures – Part 3: Loop impedance*. Brussels: CENELEC.
- [8] FLIR Systems AB. (2013). *Thermal Imaging Guidebook for Building and Renewable Energy Applications*. Wilsonville, OR: FLIR Systems AB. https://switchyourthinking.com/wp-content/uploads/2026/02/Flir-Building-guidebook_-SYT-Edit_2025.pdf
- [9] Fluke Corporation. (2026). Fluke 1736 and 1738 three-phase power quality loggers: Technical datasheet. Application Guide. Fluke Corporation.
- [10] HernandezMejia, J. C. (2016). Time domain reflectometry (TDR). Cable Diagnostic Focused Initiative (CDFI), Phase I. https://bpb-us-e1.wpmucdn.com/sites.gatech.edu/dist/6/3800/files/2023/09/5-TDR_17_with-Copyright.pdf
- [11] HewlettPackard. (1993). Time domain reflectometry theory (Application Note 13042). HewlettPackard. https://hpmemoryproject.org/an/pdf/an_1304-2.pdf
- [12] Institute of Electrical and Electronics Engineers. (1994). IEEE Std 1411993: *IEEE recommended practice for electric power distribution for industrial plants*. IEEE. <https://doi.org/10.1109/IEEESTD.1994.121642>
- [13] Institute of Electrical and Electronics Engineers. (2014). IEEE Std 5192014: *IEEE recommended practice and requirements for harmonic control in electric power systems* (Revision of IEEE Std 5191992). <https://doi.org/10.1109/IEEESTD.2014.6826459>
- [14] Institute of Electrical and Electronics Engineers. (2007). IEEE Std 1422007: *IEEE recommended practice for grounding of industrial and commercial power systems* (Revision of IEEE Std 1421991). <https://doi.org/10.1109/IEEESTD.2007.4396963>
- [15] International Electrotechnical Commission. (2024). IEC 60364552:2009/AMD1:2024. Amendment 1 – Low-voltage electrical installations – Part 552: Selection and erection of electrical equipment – Wiring systems. Geneva: IEC.
- [16] Minkina, W., & Dudzik, S. (2009). *Infrared thermography: errors and uncertainties*. John Wiley & Sons.
- [17] National Fire Protection Association. (2024). *NFPA 54: National Fuel Gas Code* (2024 edition). Quincy, MA: NFPA.
- [18] Paleczek, W. (2005). A method of investigation of moisture materials using FFT. *Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 43, 81–91.
- [19] PKN. (2009). PNEN 1775:2009. Dostawa gazu – Przewody gazowe dla budynków – Maksymalne ciśnienie robocze równe 5 bar lub mniejsze – Zalecenia funkcjonalne. Warszawa. *Polski Komitet Normalizacyjny*
- [20] PKN. (2012). PNEN 8065:2012. Wymagania dotyczące wewnętrznych instalacji wodociągowych do przesyłu wody przeznaczonej do spożycia przez ludzi – Część 5: Działanie i konserwacja. Warszawa. *Polski Komitet Normalizacyjny*
- [21] PKN. (2016). PNHD 603646:201607. Instalacje elektryczne niskiego napięcia – Część 6: Sprawdzanie. Warszawa. *Polski Komitet Normalizacyjny*
- [22] Usamentiaga, R., Venegas, P., Guerediaga, J., Vega, L., Molleda, J., & Bulnes, F. (2014). Infrared thermography for temperature measurement and Non-Destructive testing. *Sensors*, 14(7), 12305–12348. <https://doi.org/10.3390/s140712305>
- [23] Xu, J., Ma, X., Logsdon, S. D., & Horton, R. (2012). Short, multineedle frequency domain reflectometry sensor suitable for measuring soil water content. *Soil Science Society of America Journal*, 76(6), 1929–1937. <https://doi.org/10.2136/sssaj2011.0361>
- [24] Zhu, Y., Irmak, S., Jhala, A. J., Vuran, M. C., & Diotto, A. (2019). Time-domain and frequency-domain reflectometry type soil moisture sensor performance and soil temperature effects in fine- and coarse-textured soils. *Applied Engineering in Agriculture*, 35(2), 117–134. <https://doi.org/10.13031/aea.12908>
- [25] Zhu, C., Alsaman, O., & Huang, J. (2024). Highly sensitive liquid-level sensing based on microwave frequency domain reflectometry and interferometry. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 73, 1–9. <https://doi.org/10.1109/TIM.2024.3470021>



Rok założenia 1919

**POLSKIE ZRZESZENIE INŻYNIERÓW
I TECHNIKÓW SANITARNYCH ODDZIAŁ W KRAKOWIE**
POLISH ASSOCIATION OF SANITARY ENGINEERS AND TECHNICIANS

zaprasza na

XIX OGÓLNOPOLSKĄ KONFERENCJĘ NAUKOWO-TECHNICZNĄ
"WENTYLACJA • KLIMATYZACJA • OGRZEWNICTWO • ŚRODOWISKO"



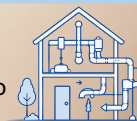
I. CIEPŁOWNICTWO I OGRZEWNICTWO – DROGA DO DEKARBONIZACJI

1. Systemy IV i V generacji
2. Wielkoskalowe pompy ciepła
3. Efektywność energetyczna budynków
4. Hybrydowe węzły ciepłe
5. Magazyny energii
6. Ciepło odpadowe



II. WENTYLACJA I KLIMATYZACJA – KOMFORT, ZDROWIE

1. Wentylacja inteligentna i hybrydowa
2. Filtracja i bezpieczeństwo zdrowotne
3. Chłodzenie pasywne
5. Jakość środowiska wewnętrznego



III. ŚRODOWISKO I GOSPODARKA OBIEGU ZAMKNIĘTEGO

1. Ślad węglowy
2. Oszczędność wody i ochrona wód
3. Retencja i błękitno-zielona infrastruktura
4. Odzysk ciepła i chłodu
5. Infrastruktura liniowa
6. Wentylacja miejska



IV. NOWOCZESNE ZARZĄDZANIE

1. Narzędzia pracy inżyniera
2. IoT w budynkach i miastach
3. Cyfrowe zarządzanie środowiskiem
4. Inteligentne opomiarowanie
5. AI w zarządzaniu energią

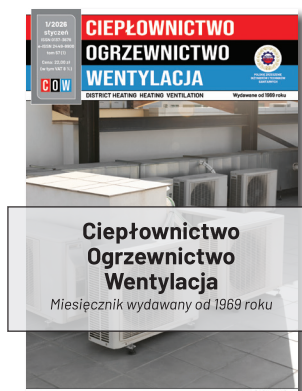
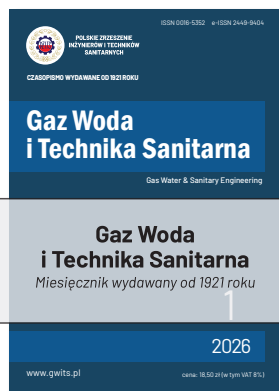


TRESNA, 22-23 PAŹDZIERNIKA 2026 r.

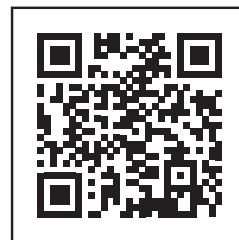
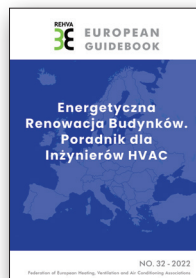
Szczegóły wydarzenia pod linkiem: <https://pzits.krakow.pl/konferencja-2026/>

Czasopisma Polskiego Zrzeszenia Inżynierów i Techników Sanitarnych w nowej odsłonie

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



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



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