



**POLSKIE ZRZESZENIE
INŻYNIERÓW I TECHNIKÓW
SANITARNYCH**

CZASOPISMO WYDAWANE OD 1921 ROKU

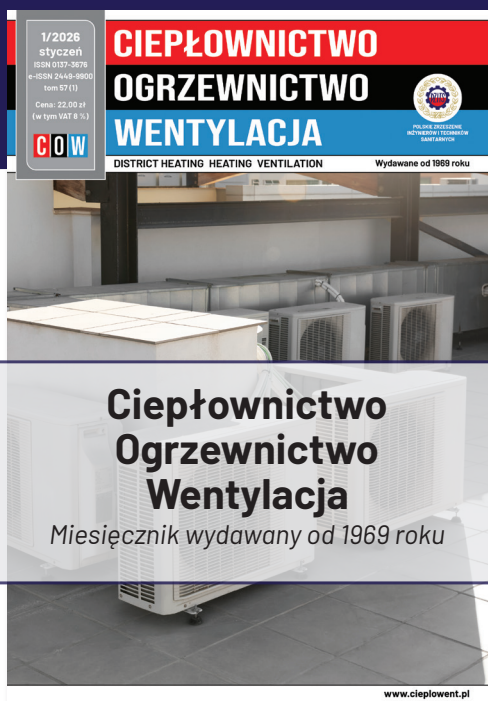
Gaz Woda i Technika Sanitarna

Gas Water & Sanitary Engineering

7

2026

Czasopisma Polskiego Zrzeszenia
Inżynierów i Techników Sanitarnych
w nowej odsłonie

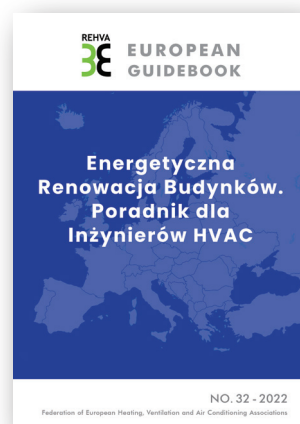


Ciepłownictwo Ogrzewnictwo Wentylacja

Miesięcznik wydawany od 1969 roku



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



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



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



KOLEGIUM REDAKCYJNE / Editorial Board

REDAKTOR NACZELNY / Editor in Chief

prof. dr hab. inż. Andrzej J. Osiadacz

ZASTĘPCA REDAKTORA NACZELNEGO / Deputy Editor in Chief

dr inż. Piotr Jadwiszczak

REDAKTORZY / Editors

dr hab. inż. Zbysław Dymaczewski – Politechnika Poznańska

dr hab. inż. Wojciech Kostowski – Politechnika Śląska

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

dr hab. inż. Małgorzata Kwestarż – Politechnika Warszawska

dr inż. Piotr Manczarski – Politechnika Warszawska

dr hab. inż. Jerzy Mikosz – Politechnika Krakowska

dr Grzegorz Rosłonek – ORLEN S.A.

dr inż. Katarzyna Umiejewska – Politechnika Warszawska

RADA PROGRAMOWO-NAUKOWA / Scientific and Program Council

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

prof. Antonio Albuquerque – University of Beira Interior, Portugalia

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

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

dr hab. inż. Dariusz Kowalski – Politechnika Lubelska

dr Ricardo Bolado Lavin – European Commission, Joint

Research Centre, Petten

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

dr Kiran Tota-Maharaj – Aston University

mgr inż. Marcin Nocoń – 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 Kostowski

Badania szczelności połączeń sieci dystrybucyjnej w aspekcie wykorzystania wodoru – część II: wyniki badań

Tightness testing of distribution network connections in terms of hydrogen use – part II: experimental results 2

Krzysztof Wzorek, Krzysztof Żakowski, Aneta Korda-Burza

Wykorzystanie parametru jednostkowej rezystancji przejścia (r_{co}) w diagnostyce stanu technicznego izolacji rurociągów o wysokiej szczelności dielektrycznejUsing the unit coating resistance (r_{co}) for evaluating the technical condition of high-integrity pipeline insulation 10

Weronika Patelska, Tomasz Schiller

Porównanie sposobów transportu ścieków z zastosowaniem metod racjonalizacji rozwiązań

Comparison of wastewater transport methods using solution rationalization methods 21

Michał Zielina, Bartosz Kopiczak, Michał Bubka, Anita Siwek

Automatyczne działko wodno-pianowe w instalacjach przeciwpożarowych – badania hydrauliczne i weryfikacja działania systemu

Automatic water-foam monitor for fire protection systems: hydraulic investigations and system performance verification 29

Jakub Fenert, Monika Żubrowska-Sudoł, Katarzyna Iwińska

Społeczna odpowiedzialność w kontekście przedsiębiorstw wodociągowo-kanalizacyjnych

Social responsibility in context of water and sewage companies 38

Witold Paleczek

Humanoidalne roboty podwodne ESA-HAUV w obsłudze technicznej budowli hydrotechnicznych

Humanoid underwater robots ESA-HAUV in the technical maintenance of hydraulic structures 46

ARTYKUŁY PARTNERSKIE

Nowe życie dojrzałych złóż. Cyfryzacja zwiększa efektywność wydobywania 36

Wszystkie opublikowane artykuły dostępne są w otwartym dostępie (Open Access) na stronie:
All published manuscripts are available online in Open Access:

www.gwits.pl facebook.com/GazWoda linkedin.com/company/gazwoda/

Badania szczelności połączeń sieci dystrybucyjnej w aspekcie wykorzystania wodoru – część II: wyniki badań

Tightness testing of distribution network connections in terms of hydrogen use – part II: experimental results

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, w której omówiono budowę stanowiska do badania szczelności elementów infrastruktury dystrybucji gazu ziemnego pod kątem zastosowania wodoru. W obecnej, II części zaprezentowano wyniki badań dla 2 kompensatorów dławicowych DN150 po ich wieloletniej eksploatacji. Czujnik elektrochemiczny wykrył dyfuzję wodoru przez uszczelnienia w sposób jednoznaczny i powtarzalny. Równocześnie stwierdzono, że sam pomiar ciśnienia nie jest wystarczający do precyzyjnej oceny szczelności wodorowej. Stwierdzono znaczną, ponad 10-krotną różnicę w szczelności wodorowej pomiędzy badanymi elementami. Ponadto zaobserwowano zjawisko akumulacji wodoru w materiałach uszczelnieniowych, powodujące opóźnione uwalnianie wodoru mimo jego usunięcia z badanego elementu.

Słowa kluczowe: wódór, dyfuzja, sieci gazowe, nieszczelność

Abstract:

This paper is a continuation of Part I, 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. In Part II, results of leakage tests performed on two DN150 pipeline expansion joints after their long-term operation are presented. For both tested elements, an electrochemical hydrogen sensor enabled a clear and repeatable detection of hydrogen permeation through the sealing system. At the same time, it was demonstrated that pressure measurements alone are insufficient for an accurate assessment of hydrogen leak tightness. The tested expansion joints exhibited a more than tenfold difference in hydrogen tightness. Furthermore, hydrogen accumulation within the sealing materials was observed, resulting in delayed hydrogen release even after the gas had been removed from the tested element.

Keywords: hydrogen, diffusion, distribution, leak

Wykaz oznaczeń

n	– ilość substancji, mol
p	– ciśnienie, kPa
R	– stała gazowa, J/(mol·K)
T	– temperatura, °C
u	– niepewność ($k = 1$), dla ciśnienia kPa
U	– niepewność rozszerzona ($k = 2$), dla ciśnienia, kPa
V	– objętość, m ³
x	– udział molowy, ppm
σ	– odchylenie standardowe, dla ciśnienia kPa

Indeksy:

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

1. Wstęp

W ostatnich latach istotnego znaczenia nabiera możliwość wykorzystania istniejącej infrastruktury gazowej w procesie transformacji energetycznej, w szczególności w kontekście integracji odnawialnych źródeł energii. Sieci gazowe rozpatrywane są jako potencjalna infrastruktura do transportu oraz magazynowania wodoru, produkowanego m.in. w procesach elektrolizy zasilanej energią pochodzącą z OZE, zwłaszcza w sytuacji braku możliwości innego zagospodarowania.

Jednocześnie implementacja wodoru w istniejących systemach gazowych wiąże się z szeregiem wyzwań technicznych i materiałowych. Wodór, ze względu na swoje właściwości fizykochemiczne, takie jak mała cząsteczka, wysoka dyfuzyjność oraz zdolność do powodowania kruchości wodorowej materiałów, stawia szczególne wymagania wobec elementów infrastruktury, w tym kompensatorów dławicowych oraz połączeń rozłącznych. Kluczowe staje się zatem określenie ich szczelności, odporności materiałowej oraz długoterminowej trwałości w warunkach pracy z mieszaninami gazu ziemnego i wodoru lub czystym wodorem.

Istotnym aspektem eksploatacji sieci i instalacji gazowych jest również analiza ryzyka związanego z występowaniem nieszczelności. Wycieki gazu, niezależnie od ich skali, mogą prowadzić do poważnych konsekwencji, takich jak zagrożenie wybuchem, emisja gazów cieplarnianych czy straty energetyczne. W przypadku wodoru ryzyko to dodatkowo wzrasta ze względu na jego szeroki zakres palności oraz wysoką przenikalność. Dlatego konieczne jest systematyczne podejście do identyfikacji zagrożeń, szacowania ryzyka oraz jego oceny w oparciu o metody ilościowe i jakościowe, takie jak analiza FMEA (*Failure Modes and Effects Analysis*, [4]), HAZOP (*Hazard and Operability Study*, [2]) czy podejście oparte na wskaźnikach niezawodności.

Minimalizacja ryzyka wymaga wdrożenia kompleksowych działań dotyczących materiałów i konstrukcji uszczelnień oraz procedur eksploatacyjnych. Szczególnie istotne jest zarządzanie ryzykiem w przypadku transportu domieszek wodoru istniejącą infrastrukturą dystrybucyjną, projektowaną do średnio- i niskociśnieniowej dystrybucji gazu ziemnego. W tym wypadku ryzyko jest związane z elementami podatnymi na dyfuzję wodoru, takimi jak uszczelnienia połączeń kołnierzowych oraz gwintowych a zwłaszcza kompensatory dławicowe, licznie występujące w systemie dystrybucyjnym w obszarach eksploatacji górniczej węgla i miedzi oraz na innych terenach niestabilnych.

O ile aspekty materiałowe dotyczące gazociągów do transportu wodoru są szeroko badane i znane w literaturze [1], to literatura dotycząca szczelności połączeń jest stosunkowo ograniczona. Zheng z zespołem [7] badali wpływ wodoru na uszczelnienia gumowe w wysokociśnieniowej infrastrukturze przesyłowej, stwierdzając m.in., że nie jest jeszcze znany wpływ degradacji czasowej na uszczelnienia. Zhou z zespołem [8] badali szczegółowy mechanizm fizyczny dyfuzji przez gumowe materiały uszczelnieniowe. W Polsce prace dotyczące szczelności wybranych połączeń mechanicznych sieci i instalacji gazowych w aspekcie dodatku wodoru prowadził Instytut Nafty i Gazu, stwierdzając brak nieszczelności przy dodatku 15% wodoru [6].

Niniejszy artykuł koncentruje się na szczególnie podatnych na nieszczelności, a nie badanych dotąd elementach, jakimi są kompensatory dławicowe. Artykuł stanowi kontynuację badań

opisanych w części I [3], w której zaprezentowano koncepcję, budowę oraz uruchomienie stanowiska badawczego II generacji. W przedstawionych badaniach wykorzystano to samo stanowisko, wzbogacone o rozwiązania wynikające z doświadczeń zdobytych podczas pierwszego etapu prac, obejmujące optymalizację toru pomiarowego oraz doprecyzowanie procedury badawczej. Pozwoliło to na zwiększenie dokładności i powtarzalności pomiarów, których wyniki zaprezentowano w niniejszym artykule w sposób możliwie kompletny, dokonując koniecznych skrótów redakcyjnych. Kolejnym etapem prowadzonych badań będzie wyznaczenie efektywnego współczynnika dyfuzji oraz ilościowa ocena strat wodoru w odniesieniu do elementów sieci dystrybucyjnej. Wyniki tych badań planuje się przedstawić w odrębnej publikacji.

2. Metodyka badań

Badania przeprowadzono na dwóch eksploatowanych kompensatorach dławicowych DN150 PN16 (rys. 1) z wykorzystaniem stanowiska badawczego II generacji, opisanego szczegółowo w części I pracy [3]. Kompensator nr 1 zabudowano w r. 1972 i był eksploatowany na sieci średniego ciśnienia, natomiast kompensator nr 2 zabudowano w r. 1987 i był eksploatowany na sieci niskiego ciśnienia. Oba urządzenia eksploatowano na gazie koksowniczym do roku 1993, następnie do 2025 na gazie ziemnym.

Celem badań było sprawdzenie, czy badane elementy zachowują szczelność lub też stwarzają ryzyko w przypadku ich zastosowania na wodorze, w szczególności określenie intensywności przenikania wodoru do otoczenia. W tym celu napełniano je wodorem pod ciśnieniem nie mniejszym niż 400 kPa, a stężenie wodoru mierzono w uszczelnionej komorze wypełnionej azotem. Sposób przeprowadzenia próby odpowiada próbie ciśnieniowej gazociągu wg ST-IGG 0902:2025 [5]. Aby stwierdzić, czy wodór przedostaje się do komory, realizowano pomiar elektrochemiczny koncentracji wodoru w ppm, oraz rejestrację ciśnienia i temperatury w elemencie i komorze.

Przed każdą serią pomiarową weryfikowano szczelność badanego elementu oraz całego układu pomiarowego. Pomiary prowadzono przy ciśnieniu przekraczającym 400 kPa; każda próba obejmowała 4-godzinny okres stabilizacji oraz 24-godzinny okres rejestracji. Rejestrowano stężenie wodoru w komorze pomiarowej oraz ciśnienie i temperaturę w elemencie i w komorze.



Rys. 1. Obiekt badany nr 1: Kompensator DN150 PN16

Źródło: opracowanie własne

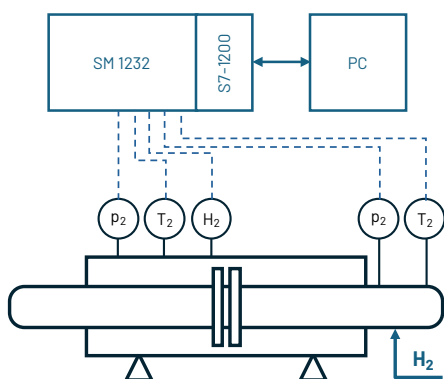
Fig. 1. Tested object: Pipeline expansion joint DN150 PN16

Source: authors' own study

Pomiar stężenia wodoru w komorze badawczej H₂ zrealizowano przy użyciu czujnika ProGas 4 firmy AtestGaz wyposażonego w moduł elektrochemiczny. Urządzenie to charakteryzuje się

zakresem pomiarowym 0–1000 ppm oraz sprzętową kompensacją wpływu temperatury otoczenia. Niepewność pomiaru nie została zadeklarowana przez producenta. Czujnik wykorzystano w trybie pracy *source*, a funkcja konwersji sygnału analogowego 4–20 mA na wielkość pomiarową x_{H_2} (ppm) obejmowała dodatkowe kodowanie stanów czujnika takich jak np. 2 mA – awaria krytyczna, 22 mA – przeciążenie gazowe.

Do pomiaru temperatury w kompensatorze T1, °C oraz komorze badawczej T2, °C zastosowano czujniki rezystancyjne Introl® IT-CF1-Pt100/B/3-PKS-3-50-G1/4 wykorzystujące termorezystor platynowy Pt100, których zmiana oporności przetwarzana była przez przetworniki temperatury INOR® APAQ-R130. Parametry ciśnienia monitorowano za pomocą przetworników JUMO® dTRANS p30, dobranych odpowiednio do zakresów: p_1 : 0–6 bar dla elementu badanego (kompensatora) oraz p_2 : 0–0,25 bar dla komory badawczej. Standardem transmisji dla wszystkich sygnałów procesowych w systemie była analogowa pętla prądowa 4–20 mA. Sygnały te doprowadzono do modułu rozszerzeń wejść analogowych SIEMENS® SM 1231 współpracującego ze sterownikiem PLC. Akwizycja danych odbywała się z okresem próbkowania $t_s = 12$ s, a zgromadzone dane przesyłano do nadrzędnej stacji inżynierskiej. Schemat systemu pomiarowego wraz z wyszczególnionymi sygnałami pomiarowymi oraz ideowym zaprezentowaniem elementów układu przedstawiono na rys. 2.



Rys. 2. Schemat ideowy systemu pomiarowego z wyszczególnionymi wielkościami mierzonymi, stacją inżynierską (PC), sterownikiem PLC (S7-1200) oraz modułem wejść analogowych (SM 1231). Źródło: opracowanie własne

Fig. 2. Schematic diagram of the measurement system with the measured quantities, engineering workstation (PC), PLC controller (S7-1200), and analog input module (SM 1231). Source: authors' own study

W przypadku pomiaru ciśnienia wyznaczono niepewność pomiarową typu B, której źródłem były parametry metrologiczne deklarowane przez producenta przetworników ciśnienia. Za źródło niepewności przyjęto odchylenie charakterystyki wynoszące $\pm 0,5\%$ końcowej wartości zakresu pomiarowego. Przy założeniu prostokątnego rozkładu prawdopodobieństwa standardowa niepewność dla przetwornika FS = 600 kPa wyniosła:

$$u_B = \frac{a}{\sqrt{3}}; \quad a = 6 \text{ kPa}; \quad u_B = 1,73 \text{ kPa}$$

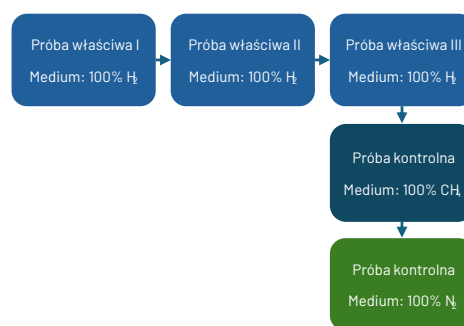
Analogicznie, dla przetwornika FS = 25 kPa otrzymano $u_B = 0,072$ kPa. Wartości te porównano ze zmianami ciśnienia w trakcie badań, traktowanymi jak losowa próba.

2.1. Plan badań

W przypadku pierwszego kompensatora badania prowadzono zgodnie z następującą sekwencją:

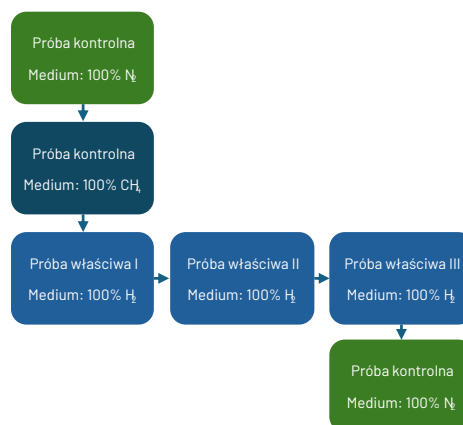
- 100% wódór – główna próba badawcza obejmująca 3 powtórzeń badania,
- 100% azot – próba kontrolna z wykorzystaniem gazu obojętnego,
- 100% gaz ziemny (metan) – próba z wykorzystaniem medium eksploatacyjnego.

W drugim kompensatorze zachowano taki sam sposób przygotowania elementu i stanowiska, zmieniając jedynie kolejność podawanych gazów w celu oceny wpływu sekwencji badań na charakter uzyskiwanych wyników. W każdym wypadku pomiędzy próbami zachowywano odstęp 24 h wraz z przedmuchaniem komory i elementu badanego azotem. Kolejności badań w poszczególnych cyklach przedstawiono na rys. 3 i 4.



Rys. 3. Sekwencja badań dla pierwszego elementu badanego
Źródło: opracowanie własne

Fig. 3. Design of experiments for the 1st tested element. Source: authors' own study



Rys. 4. Rozszerzona sekwencja badań dla drugiego elementu badanego. Źródło: opracowanie własne

Fig. 4. Extended design of experiments for the 2nd tested element. Source: authors' own study

3. Wyniki badań

3.1. Cykl I badań – element badany nr 1

3.1.1. Pomiar zasadniczy: 3 cykle napełniania wodorem.

Dla I cyklu badań wykonano trzy próby napełnienia elementu badanego czystym wodorem (tabela 1, rys. 5).

Tabela 1. Zestawienie wyników pomiaru dla I cyklu badań.

E – element badany: kompensator nr 1 DN150 PN16,

K – komora, opracowanie własne

Table 1. Summary of experimental results for the 1st cycle:

E – tested element (expansion joint DN150 PN16),

K – testing chamber, own elaboration

Wielkość	Jedn.	Próba 1		Próba 2		Próba 3	
		E	K	E	K	E	K
$x_{H_2,1}$	ppm		67,13		77,94		28,97
$x_{H_2,2}$	ppm		79,43		89,19		57,54
$x_{H_2,2} - x_{H_2,1}$	ppm		+12,30		+11,25		+28,57
$x_{H_2,max}$	ppm		84,382		95,595		60,80
$x_{H_2,min}$	ppm		60,800		73,315		24,70
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
$\frac{p_2 - p_1}{\bar{p}}$	%	+0,2%	+0,3%	+0,16%	+0,19%	-0,11%	-0,22%
p_{max}	kPa	416,67	101,38	416,45	102,12	428,82	101,57
p_{min}	kPa	412,59	101,09	412,87	101,40	426,43	100,96
$\bar{p}$	kPa	414,61	101,28	414,77	101,74	427,66	101,27
$\frac{p_{max} - p_{min}}{\bar{p}}$	%	1,0%	0,9%	0,9%	0,7%	0,6%	0,6%
$\sigma(p_i)$	kPa	1,394	0,314	1,186	0,245	1,186	0,245
$u_B(p)$	kPa	1,73	0,072	1,73	0,072	1,73	0,072
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
n_1	mol	6,506	4,021	6,507	4,027	6,661	3,989
T_2	K	291,5	291,5	291,7	291,7	293,6	293,6
n_2	mol	6,506	4,025	6,506	4,028	6,652	3,979
Δn	mol	0,000	+0,004	-0,001	+0,001	-0,009	-0,010

We wszystkich trzech próbach pomimo szumu pomiarowego zauważalnego na rys. 5 stwierdzono niewielki, ale systematyczny wzrost stężenia wodoru w czasie, największy dla próby nr 3. Są to we wszystkich przypadkach wielkości bardzo małe. Najwyższe zmierzone wartości stężenia po 1 dobie próby wynoszą ok. 90 ppm, co stanowi zaledwie ok. 0,2% dolnej granicy wybuchowości wodoru w powietrzu (4%). Wzrost ma charakter monotoniczny, co wskazuje, że wodór sukcesywnie przedostaje się z elementu badanego do komory pomiarowej.

Wyniki dotyczące ciśnień i temperatury wskazują, że w tak małym zakresie różnic stężeń oraz przy tak małej migracji wodoru nie jest możliwe jej stwierdzenie na drodze pomiarów parametrów stanu gazu, gdyż zjawisko ma zbyt małą skalę, po drugie występuje zauważalna korelacja zwłaszcza ciśnienia w komorze badawczej i temperatury (tabela 2). Wzrost ciśnienia w komorze jest więc związany ze wzrostem temperatury, a nie przyrostem ilości gazu w wyniku migracji wodoru, który jest pomijalny. Podobnie dla elementu badawczego: dla próby 2 odnotowano nieznaczny przyrost ilości gazu, co oznacza, że ubytek wodoru jest mniejszy niż niepewność wyliczenia ilości gazu w oparciu o pomiary ciśnienia i temperatury.

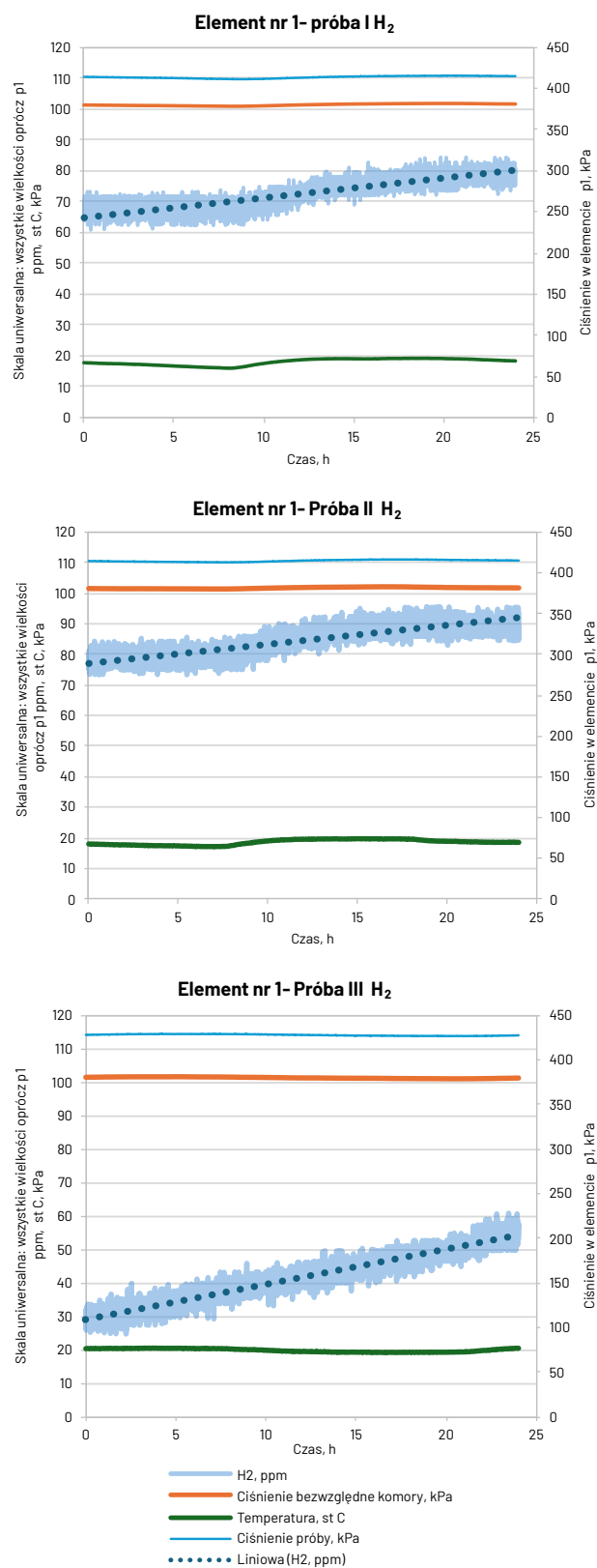
**Rys. 5.** Rejestracja wybranych parametrów podczas prób dla wodoru. Element badany nr 1**Fig. 5.** Registration of selected parameters during hydrogen tests. Tested element No. 1

Tabela 2. Współczynniki korelacji wybranych wielkości mierzonych. Element badany nr 1
Table 2. Correlation factors for selected measured quantities. Tested element No. 1

Współczynnik korelacji	Próba 1	Próba 2	Próba 3
Ciśnienia i temperatury komory	0,928	0,948	0,98
Ciśnienia komory i ciśnienia elementu	0,969	0,953	0,86
Ciśnienia i temperatury elementu	0,846	0,844	0,80

3.1.2. Pomiary kontrolne 100% CH₄ oraz 100% N₂

Po zakończeniu pomiaru zasadniczego wykonano dwa pomiary kontrolne polegające na napełnieniu elementu badanego czystym metanem oraz czystym azotem (każdorazowo po uprzednim przedmuchianiu oraz postoju 24 h). Wyniki pomiarów przedstawiono w tabeli 3, a przebieg rejestrowanych parametrów na rys. 6.

Tabela 3. Stężenie wodoru w komorze badawczej podczas prób kontrolnych wykonanych po próbach zasadniczych. Element badany nr 1

Table 3. Hydrogen concentration in the testing chamber during control tests performed following the main test series. Tested element No. 1

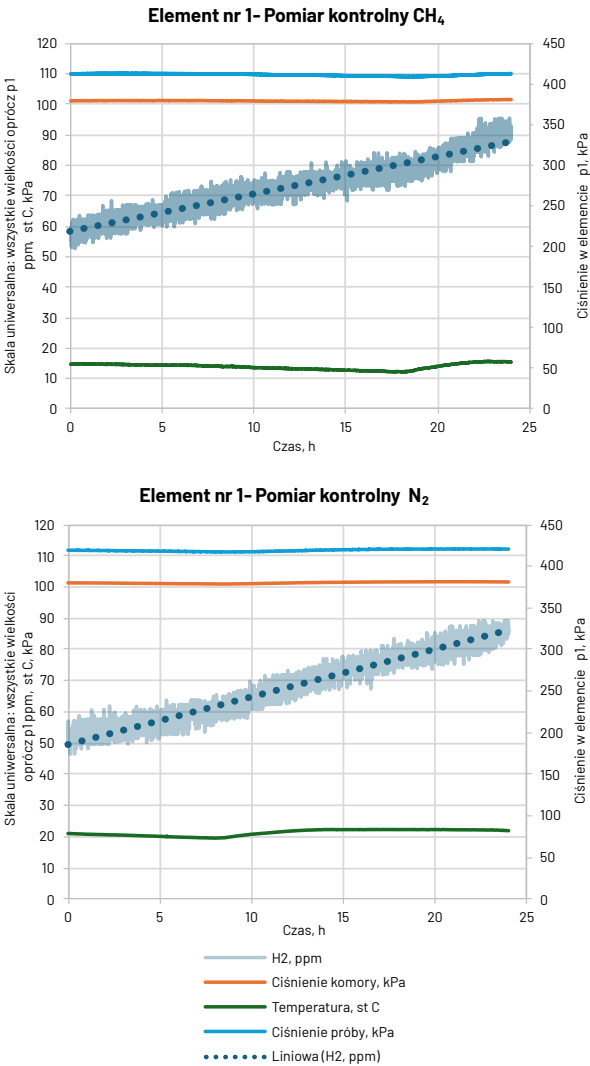
Wielkość	Jedn.	Próba CH ₄	Próba N ₂
$\chi_{H2,1}$	ppm	59,14	53,24
$\chi_{H2,2}$	ppm	89,16	84,89
$\chi_{H2,2} - \chi_{H2,1}$	ppm	30,02	31,65
$\chi_{H2,max}$	ppm	95,56	89,23
$\chi_{H2,min}$	ppm	52,66	46,41

Analiza wyników próby z wykorzystaniem metanu oraz azotu wskazuje na utrzymywanie się podwyższonego poziomu wodoru oraz jego stały wzrost w komorze badawczej pomimo braku wodoru wewnątrz badanego elementu oraz pomimo przedmuchiania komory azotem pomiędzy próbami. Rejestrowana obecność wodoru wskazuje na występowanie procesu desorpcji wodoru zaabsorbowanego podczas prób zasadniczych. Oznacza to, że materiały tworzące kompensator wykazują zdolność czasowego magazynowania wodoru, który następnie jest stopniowo uwalniany do przestrzeni komory badawczej. Najbardziej prawdopodobnymi miejscami retencji wodoru są struktura uszczelnienia dławicy, przestrzenie międzywarstwowe materiałów uszczelniających, powierzchnie wewnętrzne ścianek rury oraz obszary kontaktu pomiędzy poszczególnymi elementami kompensatora.

3.2. Cykl II badań – element badany nr 2

Z uwagi na zaobserwowaną bezwładność układu oraz akumulację wodoru w materiałach uszczelnieniowych, dla drugiego elementu badawczego zmodyfikowano plan badań. W pierwszej kolejności rozpoczęto od dokonania próby kontrolnej azotem, następnie wykonano kolejną próbę metanem. Dopiero po wy-

konaniu dwóch prób kontrolnych układu przystąpiono do próby głównej napełniając element badawczy wodorem (3 powtórzenia). Na zakończenie wykonano pojedynczą próbę kontrolną azotem.



Rys. 6. Wzrost stężenia wodoru w komorze badawczej w próbach kontrolnych wykonanych po zakończeniu prób zasadniczych. Element badany nr 1

Fig. 6. Increment of hydrogen concentration in the testing chamber in the control tests performed following the main test series. Tested element No. 1

3.2.1. Pomiar kontrolny wstępny 100% N₂ oraz 100% CH₄

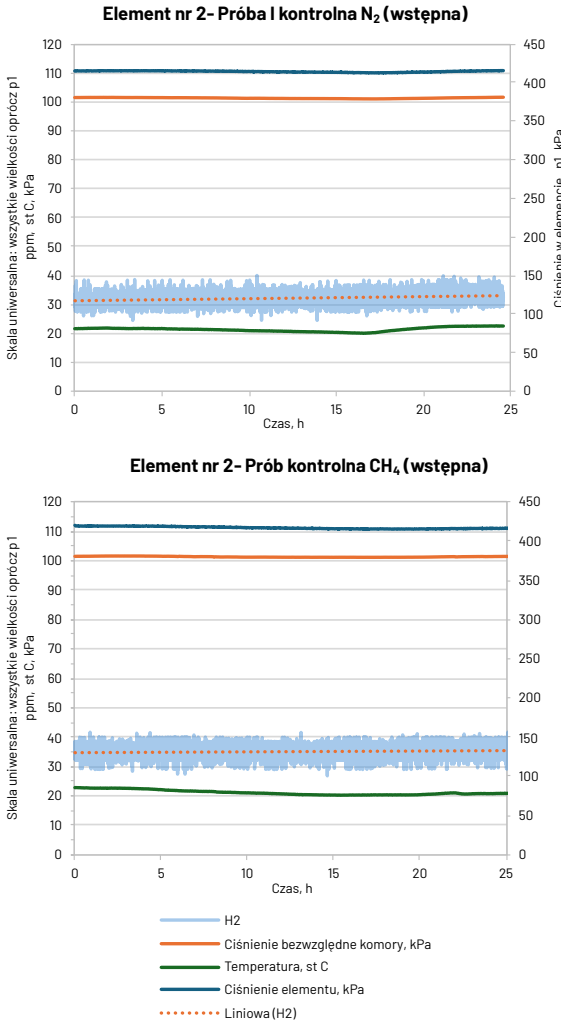
Przed rozpoczęciem pomiaru zasadniczego wykonano dwa pomiary kontrolne polegające na napełnieniu elementu badanego czystym azotem oraz czystym metanem (każdorazowo po uprzednim przedmuchianiu oraz postoju 24 h). Podobnie jak dla pomiarów zasadniczych, zastosowano ciśnienie próby > 400 kPa, czas próby 24 h oraz czas stabilizacji 4 h. Wyniki pomiarów przedstawiono w tabeli 4, a przebieg rejestrowanych parametrów na rys. 7.

Tabela 4. Stężenie wodoru w komorze badawczej podczas prób kontrolnych wykonanych przed próbami zasadniczymi.
Element badany nr 2

Table 4. Hydrogen concentration in the testing chamber during control tests preceding the main test series.
Tested element No. 2

Wielkość	Jedn.	Próba N ₂	Próba CH ₄
$x_{H2,1}$	ppm	32,227	38,520
$x_{H2,2}$	ppm	32,227	38,411
$x_{H2,2} - x_{H2,1}$	ppm	0,000	- 0,109
$x_{H2,max}$	ppm	40,003	42,788
$x_{H2,min}$	ppm	24,486	26,837

Wyniki obu prób z wykorzystaniem azotu oraz metanu wskazują na poprawne działanie układu pomiarowego oraz brak wpływu elektrochemicznego azotu oraz metanu na czujnik wodoru. Podczas całego okresu pomiarowego zarejestrowane stężenie wodoru utrzymywało się na praktycznie stałym, resztkowym poziomie, który może być związany z uprzednią eksploatacją czujnika.



Rys. 7. Resztkowe stężenie wodoru w komorze badawczej w próbach kontrolnych wykonanych przed rozpoczęciem prób zasadniczych. Element badany nr 2

Fig. 7. Residual hydrogen concentration in the testing chamber during control tests preceding the main test series. Tested element No. 2

3.2.2. Pomiar zasadniczy: 3 cykle napełniania wodorem

Dla II cyklu badań wykonano trzy próby napełnienia elementu badanego czystym wodorem. Elementem badanym był inny egzemplarz kompensatora dławicowego (nr 2) eksploatowanego uprzednio na sieci dystrybucyjnej. Wyniki pomiarów przedstawiono w tabeli 5, a przebieg rejestracji parametrów podczas prób na rys. 8.

Tabela 5. Zestawienie wyników pomiaru dla II cyklu badań.
E – element badany: kompensator nr 2 DN150 PN16,
K – komora

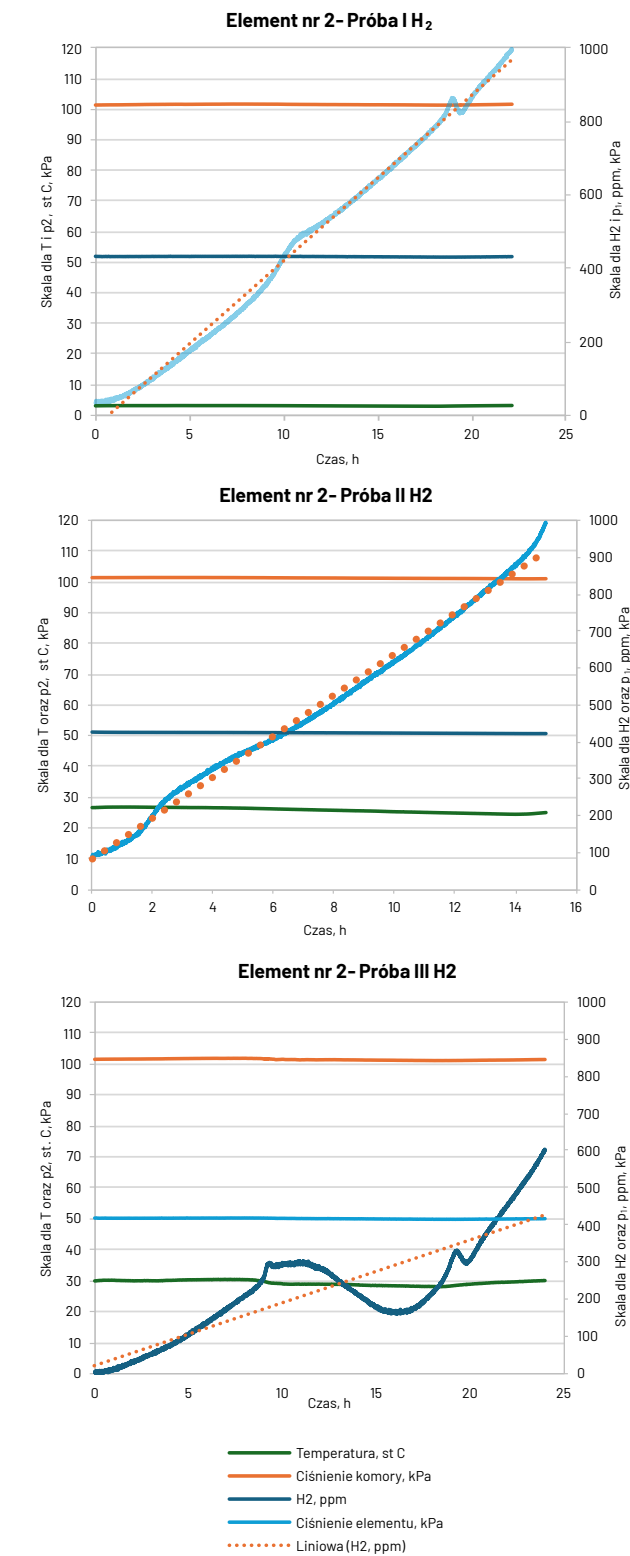
Table 5. Summary of experimental results for the 2nd cycle:
E – tested element (expansion joint No. 2 DN150 PN16),
K – testing chamber

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
$x_{H2,2} - x_{H2,1}$	ppm		965,60		902,71		597,909
$x_{H2,max}$	ppm		998,16		994,83		603,407
$x_{H2,min}$	ppm		30,60		88,65		0,940
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
$\frac{p_2 - p_1}{\bar{p}}$	%	-0,2%	+0,3%	-1,0%	-0,3%	-0,4%	-0,1%
p_{max}	kPa	432,96	101,71	426,26	101,46	418,47	101,77
p_{min}	kPa	430,62	101,36	422,03	101,02	414,97	101,02
$\bar{p}$	kPa	431,97	101,55	424,10	101,28	416,86	101,37
$\frac{p_{max} - p_{min}}{\bar{p}}$	%	0,5%	0,3%	1,0%	0,4%	0,8%	0,7%
$\sigma(p_i)$	kPa	0,65	0,10	1,14	0,14	1,18	0,23
$u_B(p)$	kPa	1,73	0,072	1,73	0,072	1,73	0,072
V	m ³	0,038	0,096	0,038	0,096	0,038	0,096
T_1	K	298,7	298,7	299,7	299,7	303,1	303,1
n_1	mol	6,625	3,919	6,500	3,907	6,309	3,864
T_2	K	299,6	299,6	298,1	299,9	303,2	303,2
n_2	mol	6,590	3,918	6,472	3,891	6,281	3,861
Δn	mol	-0,034	0,001	-0,028	-0,015	-0,028	-0,004

Tabela 6. Współczynniki korelacji wybranych wielkości mierzonych. Element badany nr 2

Table 6. Correlation factors for selected measured quantities.
Tested element No. 2

Współczynnik korelacji	Próba 1	Próba 2	Próba 3
Ciśnienia i temperatury komory	0,779	0,990	0,894
Ciśnienia komory i ciśnienia elementu	0,859	0,984	0,894
Ciśnienia i temperatury elementu	0,793	0,986	0,835



Rys. 8. Rejestracja parametrów w cyklu badanym nr 2.
Element badany nr 2
Fig. 8. Registration of parameters in the 2nd cycle.
Tested element No. 2

Wyniki pomiarów znacząco różnią się od I cyklu badań. W każdej z prób zarejestrowano znaczący wzrost stężenia wodoru w komorze badawczej, przy czym w próbie 1 i 2 stężenie zbliżyło się do wartości granicznej 1000 ppm odpowiednio po 22 oraz 15 godzinach, co wymusiło wcześniejsze zakończenie próby.

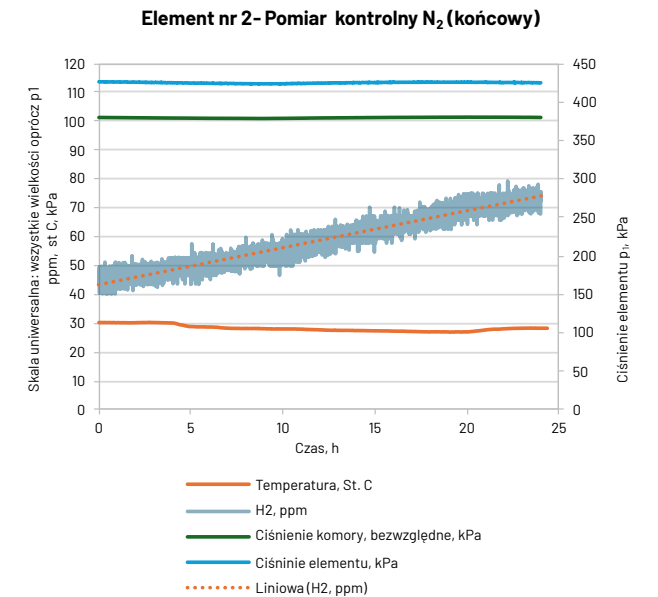
W 3 próbie wzrost stężenia był nieco mniejszy (do 603,4 ppm), ale również o rząd wielkości wyższy niż dla elementu 1. W trakcie wszystkich prób ciśnienie w elemencie badanym, ciśnienie w komorze oraz temperatura pozostawały w zasadzie stabilne, co potwierdza prawidłowy przebieg pomiaru i zachowanie porównywalnych warunków badawczych. Tym niemniej, we wszystkich próbach odnotowano spadek ciśnienia w elemencie od 0,2 do 1%, oraz wyznaczono ubytek molowy wodoru w elemencie, co może świadczyć, że skala transportu wodoru jest na tyle duża, że daje się zaobserwować również na drodze pomiaru ciśnienia. Równocześnie, nie obserwowano jednoznacznego przyrostu ilości gazu w komorze, co związane jest z tym, że szczelność tej komory względem otoczenia nie jest absolutna (manszety uszczelniające), co jednak nie wpływa negatywnie na interpretację wyników.

3.2.3. Pomiar kontrolny 100% N₂

Wyniki pomiaru kontrolnego zrealizowano po pomiarach głównych przedstawiono w tabeli 7 oraz na rys. 9.

Tabela 7. Stężenie wodoru w komorze badawczej podczas próby kontrolnej wykonanej po próbach zasadniczych.
Element badany nr 2
Table 7. Hydrogen concentration in the testing chamber during control tests following the main test series.
Tested element No. 2

Wielkość	Jedn.	Próba N ₂
$\chi_{H2,1}$	ppm	46,477
$\chi_{H2,2}$	ppm	75,051
$\chi_{H2,2} - \chi_{H2,1}$	ppm	28,573
$\chi_{H2,max}$	ppm	79,282
$\chi_{H2,min}$	ppm	40,148



Rys. 9. Wzrost stężenia wodoru w komorze w próbie azotowej, element nr 2 – wynik akumulacji w materiale
Fig. 9. Increment of hydrogen concentration during the final nitrogen test, element No. 2: result of hydrogen accumulation in the tested element material

Po zakończeniu serii prób z wykorzystaniem wodoru wykonano pomiar kontrolny z wykorzystaniem azotu. Podobnie jak dla cyklu I badań, zarejestrowano systematyczny wzrost stężenia wodoru od 40,15 ppm do 79,28 ppm. W przeciwieństwie do wcześniejszych prób kontrolnych wykonanych przed badaniami z wodorem, przebieg zmian wykazywał wyraźną tendencję wzrostową utrzymującą się przez cały okres pomiarowy. Jednocześnie ciśnienie bezwzględne w badanym elemencie utrzymywało się na średnim poziomie 425,0 kPa, natomiast ciśnienie w komorze pozostawało praktycznie niezmiennie i wynosiło około 101,2 kPa. Zmiany ciśnienia w komorze były pomijalnie małe (0,001%), a temperatura utrzymywała się na stabilnym poziomie około 298,6 K, co potwierdza zachowanie porównywalnych warunków prowadzenia pomiaru. Pomimo zastosowania jako medium badawczego wyłącznie azotu, detektor rejestrował stopniowy wzrost stężenia wodoru w komorze badawczej. Potwierdzono zatem zjawisko retencji wodoru w materiałach uszczelnieniowych.

4. Wnioski i plan dalszych badań

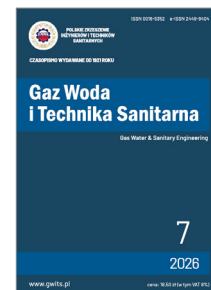
Przeprowadzone badania zrealizowane na dwóch wyeksploatowanych obiektach infrastruktury dystrybucyjnej dały interesujące wnioski:

- W obu wypadkach zastosowany układ pomiarowy pozwolił w sposób powtarzalny na detekcję migracji wodoru z badanego elementu do otoczenia.
- W przypadku napełnienia badanego elementu wodorem migracja ta (dyfuzja) zachodzi w każdym przypadku.
- Detekcja wodoru jest możliwa na drodze czujnika elektrochemicznego, natomiast pomiar parametrów stanu (ciśnienie i temperatura) nie jest wystarczający.
- Badane obiekty znacząco różnią się skalą dyfuzji wodoru: różnica koncentracji końcowej wodoru jest ponad 10-krotna.
- Wbrew intuicji, obiektem o gorszej szczelności jest obiekt znacznie nowszy, co może być wynikiem różnych warunków eksploatacji (dynamika terenu i mechanizmu urzęduowania), gorszej jakości wykonania elementu 2 lub też wynikiem samoczynnego doszczelnienia elementu 2 w wyniku wieloletniej eksploatacji pod wyższym ciśnieniem niż element 1. Trudno jednak wykluczyć czynnik losowy.
- Zaobserwowano zjawisko retencji wodoru w materiałach, co w praktyce eksploatacji może być źródłem fałszywych, mylących sygnałów w przypadku np. okresowego stosowania wodoru.

- Opracowana metodyka badawcza może zostać zastosowana do oceny innych typów połączeń i uszczelnień występujących w systemie dystrybucji gazu. Dla każdego badanego rozwiązania możliwe jest wyznaczenie efektywnego współczynnika dyfuzji, strumienia przenikania oraz rocznej ilości wodoru migrującej przez dane połączenie. Takie podejście pozwala porównać różne konstrukcje uszczelnień pod względem ich podatności na przenikanie wodoru oraz określić, czy transport czystego wodoru lub mieszanin gazu ziemnego z wodorem może powodować istotne straty gazu albo wpływać na bezpieczeństwo eksploatacji sieci.

5. Literatura

- [1] Islam, A., Alam, T., Sheibley, N., Edmonson, K., Burns, D., & Hernandez, M. (2024). Hydrogen blending in natural gas pipelines: A comprehensive review of material compatibility and safety considerations. *International Journal of Hydrogen Energy*, 93, 1429-1461. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2024.10.384>
- [2] Kletz, T. 2006. *HAZOP and HAZAN: Identifying and Assessing Process Industry Hazards*. 4th ed. Boca Raton: CRC Press.
- [3] Kroczyk 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), 14–19. <https://doi.org/10.15199/17.2025.7-8.2>
- [4] Stamatis D. H. 2003. *Failure Mode and Effect Analysis: FMEA from Theory to Execution*. 2nd ed. Milwaukee: ASQ Quality Press
- [5] ST-IGG-0902:2025. *Gazociągi. Próby ciśnieniowe gazociągów stalowych*.
- [6] 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>
- [7] Zheng, Y., Tan, Y., Zhou, C., Chen, G., Li, J., Liu, Y., ... & 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>
- [8] 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>



Wykorzystanie parametru jednostkowej rezystancji przejścia (r_{co}) w diagnostyce stanu technicznego izolacji rurociągów o wysokiej szczelności dielektrycznej

Using the unit coating resistance (r_{co}) for evaluating the technical condition of high-integrity pipeline insulation

Krzysztof Wzorek^{1*} , Krzysztof Żakowski² , Aneta Korda-Burza³

¹ Operator Gazociągów Przesyłowych GAZ-SYSTEM S.A., Oddział w Tarnowie, Szkoła Doktorska Wdrożeniowa, Politechnika Gdańska

² Wydział Chemiczny, Politechnika Gdańska

³ Operator Gazociągów Przesyłowych GAZ-SYSTEM S.A, Pion Badawczy i Laboratoriów

*Kontakt / Correspondence: krzysztof.wzorek@gaz-system.pl

Streszczenie:

Artykuł prezentuje diagnostykę powłok izolacyjnych rurociągów przesyłowych o wysokiej szczelności. Celem badań była ocena integralności izolacji 28-kilometrowego odcinka gazociągu poprzez wyznaczenie jednostkowej rezystancji przejścia (r_{co}). Na podstawie modelu linii długiej o parametrach rozłożonych zebrano dane metodą Current Span w 12 punktach kontrolnych przy obniżonym potencjale ochrony. Wyniki pozwoliły zidentyfikować sekcje o różnej szczelności, wykryć lokalne anomalie oraz ocenić wpływ środowiska. Metodologia ta stanowi bezodkrywkowe narzędzie do obiektywnej oceny starzenia się powłok i wczesnego wykrywania uszkodzeń.

Słowa kluczowe: ochrona katodowa, jednostkowa rezystancja przejścia (r_{co}), rurociągi przesyłowe, powłoki izolacyjne, model linii długiej, metoda Current Span, diagnostyka bezodkrywkowa, korozja

Abstract:

This article presents the diagnostics of insulating coatings on high-integrity transmission pipelines. The study aimed to evaluate the insulation integrity of a 28-kilometer gas pipeline section by determining the unit coating resistance (r_{co}). Based on a distributed-parameter transmission line model, data was collected using the Current Span method at 12 test stations under a reduced protection potential. The results enabled the identification of sections with varying tightness, the detection of local anomalies, and the assessment of environmental impacts. This methodology serves as a non-invasive tool for the objective evaluation of coating aging and early defect detection.

Keywords: cathodic protection, unit coating resistance (r_{co}), transmission pipelines, insulation coatings, long line model, current span method, non-destructive testing, corrosion

1. Wprowadzenie

1.1. Reaktywność żelaza

Żelazo jest aktywnym chemicznie metalem o stosunkowo niskim potencjale standardowym (w odniesieniu do elektrody wodorowej (SHE) to $-0,44$ V [1]), co sprawia, że w środowisku naturalnym niezwykle łatwo wchodzi w reakcje z utleniaczami, dążąc do osiągnięcia trwałego energetycznie stanu utlenienia Fe^{2+} lub Fe^{3+} [1]. Kluczowym aspektem jego destrukcji jest fakt,

że w obecności wody i tlenu proces ten przybiera charakter elektrochemiczny, tworząc na powierzchni metalu mikroogniwa [2], w których żelazo pełni rolę anody i ulega nieustannemu roztwarzaniu. W przeciwieństwie do metali takich jak aluminium czy chrom, produkty utleniania żelaza, czyli uwodnione tlenki żelaza (III), nie wykazują właściwości pasywujących – ich struktura jest luźna, nietrwała i higroskopijna, co zamiast hamować korozję, wręcz ją stymuluje poprzez ułatwianie transportu reagentów w głąb struktury krystalicznej metalu. Ta chemiczna bezbronność produktów korozji powoduje, że raz zainicjowany

proces utleniania postępuje w sposób ciągły i destrukcyjny, aż do całkowitego naruszenia integralności mechanicznej elementu. To właśnie ta cecha czyni aktywność chemiczną żelaza głównym wyzwaniem dla trwałości współczesnej infrastruktury technicznej.

1.2. Przeciwdziałanie korozji

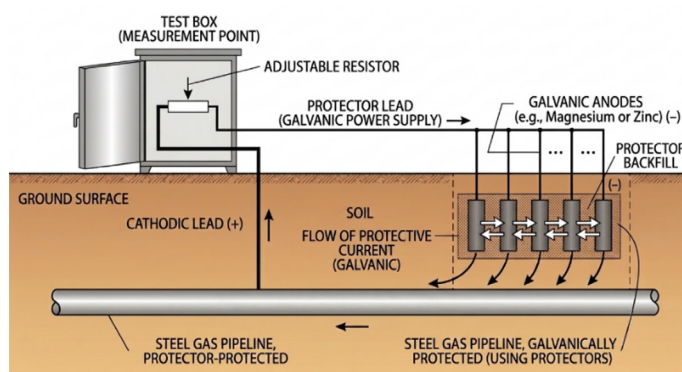
Ta wysoka reaktywność żelaza i nieszczelność jego warstwy tlenkowej generują ogromne wyzwania gospodarcze oraz techniczne, wymuszając na inżynierach prowadzenie nieustannych, kosztownych działań prewencyjnych. Zalicza się do nich systematyczną konserwację powłok malarskich, stosowanie zaawansowanych metod ochrony katodowej czy nakładanie warstw galwanicznych [3], gdyż bez ciągłego monitoringu i aktywnego przeciwdziałania naturalna dążność żelaza do powrotu do formy tlenkowej doprowadziłaby do degradacji kluczowej infrastruktury, od mostów i rurociągów po maszyny przemysłowe i konstrukcje budowlane.

1.3. Ochrona katodowa

W tym kontekście za jedno z kluczowych i najbardziej zaawansowanych rozwiązań uznaje się ochronę katodową, polegającą na celowym obniżeniu potencjału elektrochemicznego chronionej konstrukcji [4]. W praktyce realizuje się to za pomocą stacji ochrony katodowej (wymuszony przepływ prądu z zewnętrznego źródła) lub poprzez zastosowanie protektorów (anod galwanicznych). Takie działanie wymusza na żelazie rolę katody i niemal całkowicie hamuje proces jego utleniania. Obecnie metoda ta stanowi niezbędny element zabezpieczania infrastruktury podziemnej, kadłubów statków oraz zbiorników technicznych przed niszcącym wpływem środowiska.

1.3.1. Metoda protektorowa

Metoda protektorowa rodzaj elektrochemicznej ochrony katodowej, która polega na wykorzystaniu naturalnej różnicy potencjałów między metalami poprzez połączenie stali z metalem o znacznie wyższej aktywności chemicznej, takim jak cynk, magnez czy aluminium [4]. W tak utworzonym ogniwie galwanicznym (rys. 1) metal bardziej aktywny staje się anodą (protektorem) i to on przejmuje na siebie proces utleniania, ulegając stopniowemu rozpuszczaniu, podczas gdy chroniona konstrukcja stalowa staje się katodą i pozostaje nienaruszona. Jest to rozwiązanie skuteczne w środowiskach dobrze przewodzących, jak woda morska czy wilgotna gleba, ponieważ nie wymaga zewnętrznego źródła zasilania – protektor zużywa się elektrochemicznie, aż do momentu swojego całkowitego rozpuszczenia, co czyni tę metodę stosunkowo prostą w montażu, choć wymagającą okresowej wymiany elementów ochronnych.



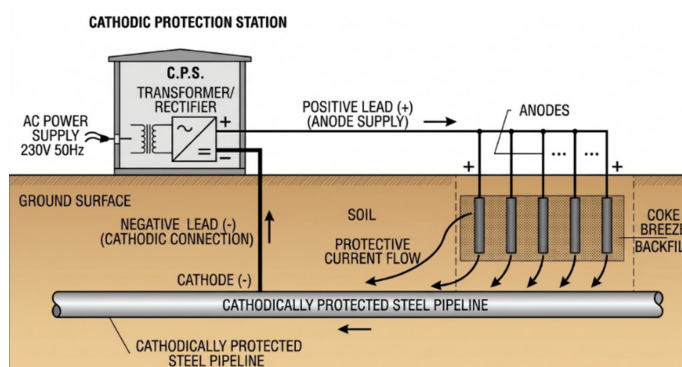
Rys. 1. Schemat działania ochrony galwanicznej (opracowanie własne na podstawie [4])

Fig. 1. Schematic of galvanic cathodic protection (adapted from [4])

1.3.2. Ochrona katodowa z zewnętrznym źródłem zasilania

Ochrona katodowa prądem zewnętrznym (rys. 2) to zaawansowana metoda polegająca na wymuszeniu przepływu prądu elektrycznego w kierunku chronionej konstrukcji za pomocą zewnętrznego zasilacza prądu stałego. W tym układzie ujemny biegun zasilacza łączy się z konstrukcją stalową, czyniąc ją katodą, natomiast biegun dodatni podpiną się do specjalnych, trudno rozpuszczalnych anod polaryzacyjnych (często wykonanych z żeliwa wysokokrzemowego, tytanu pokrytego platyną lub grafitu) umieszczonych w tym samym środowisku elektrolitycznym.

W przeciwieństwie do metody protektorowej, to rozwiązanie pozwala na precyzyjną regulację natężenia prądu w zależności od agresywności korozyjnej otoczenia i powierzchni chronionego obiektu, co czyni ją idealną do zabezpieczania ogromnych struktur o dużym zapotrzebowaniu na prąd ochronny, takich jak długodystansowe rurociągi, rozbudowane portowe konstrukcje stalowe czy dna dużych zbiorników paliwowych. Choć wymaga ona stałego dostępu do energii elektrycznej i regularnego monitoringu sprawności urządzeń, oferuje znacznie dłuższą żywotność i wyższą skuteczność niż metoda z wykorzystaniem protektorów o niższym potencjale elektrochemicznym, szczególnie w środowiskach o zróżnicowanej rezystywności [5], gdzie naturalna różnica potencjałów byłaby niewystarczająca do powstrzymania korozji.



Rys. 2. Schemat działania ochrony katodowej z zewnętrznym źródłem zasilania (opracowanie własne na podstawie [4])

Fig. 2. Schematic of impressed current cathodic protection (adapted from [4])

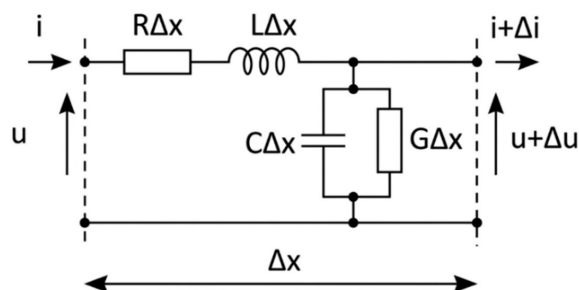
2. Model elektryczny rurociągu podziemnego z aktywną ochroną katodową

2.1. Gazociąg jako elektryczna linia długa

W ujęciu elektrotechnicznym rurociąg ze względu na swoją rozpiętość i ciągłość metaliczną modeluje się jako linię długą o parametrach rozłożonych [6]. W układzie tym potencjał ochronny i natężenie prądu ulegają stopniowemu tłumieniu, co wynika z podłużnej rezystancji metalu oraz poprzecznej przewodności upływu. Analiza linii długiej pozwala na dokładne obliczenie spadków napięć i optymalne rozmieszczenie stacji ochrony katodowej, gwarantując skuteczne hamowanie korozji w punktach najdalej oddalonych od zasilacza.

W modelu tym uwzględnia się również indukcyjność szeregową stali (istotną w stanach nieustalonych i przy oddziaływaniu pól linii elektroenergetycznych wysokiego napięcia) oraz pojemność równoległą na styku metal-grunt, gdzie izolacja pełni rolę dielektryka [5]. Parametry te decydują o reaktancji układu, wpływając na rozchodzenie się prądu i reakcję systemu na zewnętrzne zakłócenia elektromagnetyczne.

Elektryczny model segmentu rurociągu przedstawia się w formie klasycznego czwórnik (rys. 3). Połączone szeregowo rezystancja i indukcyjność metalu odpowiadają za spadki napięcia wzdłuż rury, natomiast równoległa pojemność i rezystancja przejścia izolacji obrazują upływ prądu do otoczenia. Taki schemat pozwala na matematyczną analizę rurociągu jako łańcucha powtarzalnych ogniw, kluczową dla wyznaczenia rozkładu potencjału.



Rys. 3. Pojedynczy segment rurociągu (opracowanie własne na podstawie [6])

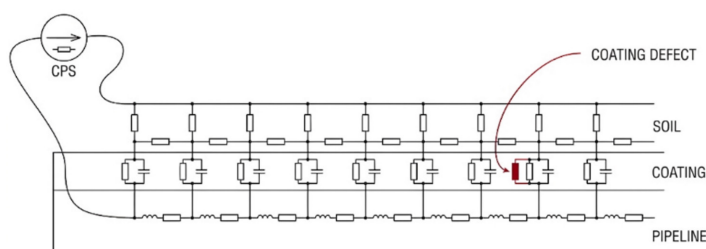
Fig. 3. Single pipeline segment (adapted from [6])

Opis parametrów modelu elektrycznego odcinka rurociągu:

- $R\Delta x$ – rezystancja liniowa rurociągu
- $L\Delta x$ – indukcyjność liniowa rurociągu
- $C\Delta x$ – pojemność powłoki izolacyjnej
- $G\Delta x$ – przewodność powłoki izolacyjnej
- Δx – odcinek rurociągu
- u – różnica potencjałów gleba-rurociąg
- i – prąd ochrony katodowej

Ten schemat zastępczy (typu czwórnik) pozwala na matematyczne modelowanie rozkładu potencjałów i prądów wzdłuż długich rurociągów przesyłowych. Ponadto, w pełnym modelu elektrycznym takiego obwodu należy uwzględnić złożoną strukturę oporności środowiska, w której kluczową rolę odgrywają

zarówno rezystancje gruntu wzdłuż rurociągu, jak i rezystancje przejścia do układu anodowego. Zmienna rezystywność gruntu na trasie przebiegu konstrukcji powoduje, że prąd ochronny napotyka na niejednorodny opór, co bezpośrednio wpływa na efektywność polaryzacji poszczególnych odcinków rury. Jednocześnie rezystancja doziemna układu anodowego określa sprawność, z jaką prąd z zasilacza jest w stanie „wypłynąć” z uziomu anodowego do gruntu i zamknąć obwód przez konstrukcję. Oba te parametry rezystancyjne muszą być precyzyjnie oszacowane, aby poprawnie zaprojektować moc zasilacza i zapewnić równomierny rozkład potencjału ochronnego na całej długości rurociągu, nawet w trudnych i zmiennych warunkach geologicznych. Ideę tą przedstawia rys. 4.

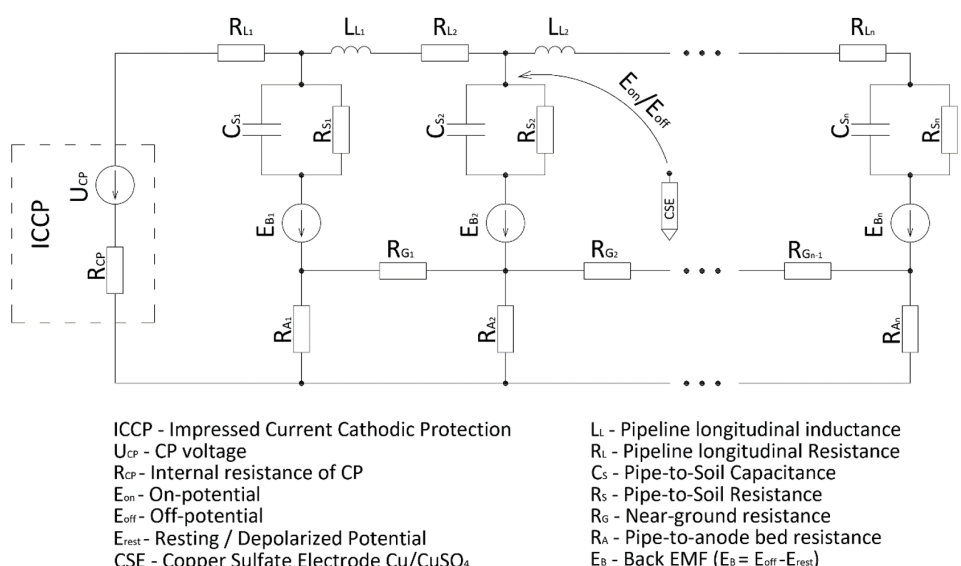


Rys. 4. Rurociąg jako linia długa (opracowanie własne)

Fig. 4. Pipeline as a long line (own elaboration)

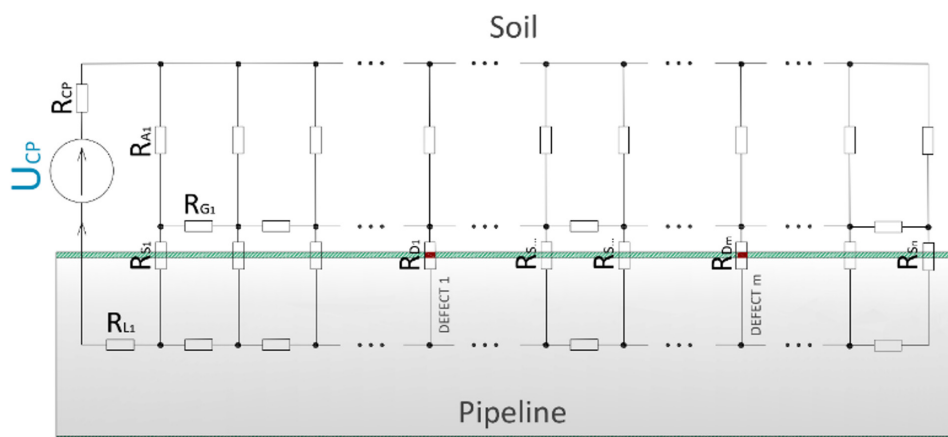
2.2. Elektryczny schemat zastępczy rurociągu chronionego katodowo

Na rys. 5 przedstawiono sformalizowany schemat zastępczy rurociągu podziemnego, który w stosunku do klasycznych modeli elektroizolacyjnych został rozbudowany o rzeczywiste parametry układu ochrony katodowej oraz charakterystykę elektrochemiczną granicy faz metal-grunt. Kluczowym elementem tej struktury jest wprowadzenie siły przeciwelektromotorycznej (E_b , ang. Back EMF) [7], wyznaczonej jako różnica pomiędzy potencjałem wyłączeniowym (E_{off}) a potencjałem stacjonarnym/depolaryzacji (E_{rest}). Siła ta bezpośrednio reprezentuje stan spolaryzowania elektrochemicznego rurociągu, odzwierciedlając procesy akumulacji ładunku na pojemności rura-ziemia (C_s) oraz kinetykę reakcji katodowych zachodzących w warstwie przypowierzchniowej. Zastosowanie takiego podejścia pozwala na kompleksową, wielokryterialną analizę pracy systemu ochrony prądem zewnętrznym (ICCP). Prezentowany model w sposób sformalizowany integruje parametry własne konstrukcji (wzdłużną rezystancję R_L i indukcyjność L_L) z wielkościami opisującymi zewnętrzną stację ochrony katodowej (napięcie U_{CP} , rezystancja wewnętrzna R_{CP}) oraz rezystancjami środowiskowymi, do których należą rezystancja uziemienia bliskiego (R_G) i rezystancja rura-grunt-anoda (R_A). Dzięki temu schemat stanowi podstawę teoretyczną do precyzyjnego wyznaczania parametrów diagnostycznych powłoki, w tym rezystancji przejścia (R_s , tożsamej z kluczowym parametrem R_{CO}), umożliwiając m.in. eliminację składowej omowej (spadku napięcia I_R) z pomiarów potencjału załączeniowego (E_{ON}).



Rys. 5. Elektryczny schemat zastępczy rurociągu podziemnego (opracowanie własne)

Fig. 5. Electrical equivalent circuit of a buried pipeline (own elaboration)



Rys. 6. Komponent rezystancyjny rurociągu podziemnego (opracowanie własne)

Fig. 6. Resistive component of a buried pipeline (own elaboration)

2.3. Redukcja modelu linii długiej do aspektu rezystancyjnego

W dalszej części opracowania uwaga zostanie skupiona na analizie kontekstu rezystancyjnego oraz spadków zadanego prądu ochrony katodowej w odniesieniu do lokalizacji i identyfikacji defektów izolacji rurociągu. Rozpatrywane będą mechanizmy przepływu prądu w obwodzie oraz zmiany rozkładu potencjału, które stanowią podstawę diagnostyki szczelności powłok ochronnych. Poprzez badanie anomalii w rezystancji przejścia oraz zmian natężenia prądu wzdłuż konstrukcji, możliwe będzie precyzyjne wskazanie miejsc uszkodzeń izolacji, w których dochodzi do nadmiarowego upływu prądu do gruntu – aspekt rezystancyjny tego procesu na schemacie zastępczym rurociągu podziemnego zilustrowano na rys. 6.

Przyjęcie podejścia rezystancyjnego oraz analiza rurociągu jako układu o parametrach rozłożonych prowadzi do sformułowa-

nia powyższego schematu zastępczego, gdzie:

- R_L – odpowiadają rezystancji podłużnej samej rury stalowej
- R_S – reprezentują rezystancję przejścia sprawnej izolacji
- R_D – (zaznaczona kolorem czerwonym) obrazuje gwałtowny spadek rezystancji w miejscu wystąpienia defektu powłoki
- R_G oraz R_A – modelują rezystancję gruntu oraz rezystancję rura-grunt-anoda
- U_{CP} wraz z R_{CP} – stanowią układ zasilania ochrony katodowej

Taki model pozwala na precyzyjne śledzenie rozprywu prądów ochronnych i identyfikację miejsc, w których pojawienie się defektu (R_D) powoduje lokalne zaburzenia potencjału, co jest kluczowe dla diagnostyki stanu technicznego izolacji bez konieczności odkopywania rurociągu.

2.4. Rezystancja przejścia odcinka rurociągu

Prezentowany model rurociągu to sieć rezystancyjna (model drabinkowy), w której kluczowym parametrem diagnostycznym jest całkowita rezystancja przejścia rurociąg-ziemia, oznaczona jako R_{co} [5]. Wartość tę wylicza się jako odwrotność sumy konduktancji wszystkich równoległych ścieżek upływu prądu. Taki sposób obliczeń wynika bezpośrednio z praw elektrotechniki dotyczących połączeń równoległych: prąd ochrony katodowej może wydostawać się z rury do otoczenia albo przez naturalną porowatość „zdrowej” izolacji (R_S), albo przez punktowe uszkodzenia mechaniczne, czyli defekty (R_D). W analizie tej celowo pomija się inne składowe widoczne na schemacie, takie jak rezystancja metalu rury (R_L) czy rezystancja podłużna gruntu (R_G). Rezystancja stali jest o wiele rzędów wielkości mniejsza od rezystancji izolacji, przez co rura w danym przekroju traktowana jest jako punkt o stałym potencjale, natomiast rezystancja gruntu jest parametrem zewnętrznym, zależnym od warunków atmosferycznych, a nie od stanu technicznego samej powłoki. W analizie skupionej na diagnostyce izolacji rurociągu, rezystancja przejścia do układu anodowego (R_A) jest pomijana, ponieważ z punktu widzenia lokalizacji defektów stanowi ona stały parametr zewnętrzny całego układu. Dzięki takiemu podejściu parametr R_{co} staje się precyzyjnym wskaźnikiem jakości izolacji, w którym nawet pojedynczy defekt o niskiej rezystancji drastycznie obniża wartość całkowitą, alarmując o konieczności naprawy. W konsekwencji, relację tę opisuje zaproponowane na potrzeby niniejszego badania równanie (1):

$$R_{co} = \left(\sum_{i=1}^n \frac{1}{R_{Si}} + \sum_{j=1}^m \frac{1}{R_{Dj}} \right)^{-1} \quad (1)$$

gdzie:

- R_{co} – rezystancja przejścia odcinka rurociągu, Ω
- R_{Si} – cząstkowa rezystancja izolacji rurociągu, Ω
- R_{Dj} – rezystancja pojedynczego defektu rurociągu, Ω

Człon pierwszy $\sum_{i=1}^n \frac{1}{R_{Si}}$ reprezentuje rezystancję izolacji na n odcinakach, natomiast człon drugi $\sum_{j=1}^m \frac{1}{R_{Dj}}$ reprezentuje m

zidentyfikowanych defektów izolacji, które zazwyczaj charakteryzują się znacznie mniejszą rezystancją, a tym samym dominują w końcowej wartości R_{co} .

2.5. Jednostkowa rezystancja przejścia odcinka rurociągu

Jednostkowa rezystancja przejścia (r_{co}) [5], jest to rezystancja przejścia dla powierzchni $S = 1 \text{ m}^2$ co opisuje zależność (2):

$$r_{co} = R_{co} \cdot S \quad (2)$$

gdzie:

- (r_{co}) – jednostkowa rezystancja przejścia odcinka rurociągu, Ω
- R_{co} – rezystancja przejścia odcinka rurociągu, Ω
- S – pole powierzchni zewnętrznej rurociągu, m^2

Wprowadzenie tego parametru jest niezbędne dla celów porównawczych, gdyż pozwala na obiektywną ocenę stanu powłoki izolacyjnej niezależnie od średnicy rury czy długości rozpatrywanego odcinka. Podczas gdy rezystancja całkowita R_{co} maleje wraz ze wzrostem długości gazociągu (zgodnie z zasadą łączenia równoległego), wartość jednostkowa r_{co} powinna pozostawać relatywnie stała dla danego typu izolacji ułożonej w jednorodnych warunkach gruntowych. W praktyce inżynierskiej parametr ten stanowi fundament klasyfikacji jakościowej izolacji. Wysokie wartości r_{co} , rzędu $10^8 \div 10^9 \Omega \cdot \text{m}^2$, świadczą o doskonałym stanie powłok syntetycznych (np. polietylenowych), natomiast spadki poniżej wartości krytycznych określonych w normach [8] sygnalizują postępującą degradację materiałową lub obecność rozproszonych wad mikroskopijnych. Dzięki przeliczeniu rezystancji na jednostkę powierzchni, możliwe jest zestawienie wyników z różnych sekcji rurociągu i precyzyjne wytypowanie tych fragmentów, które wymagają intensyfikacji ochrony katodowej lub bezpośredniej naprawy izolacji.

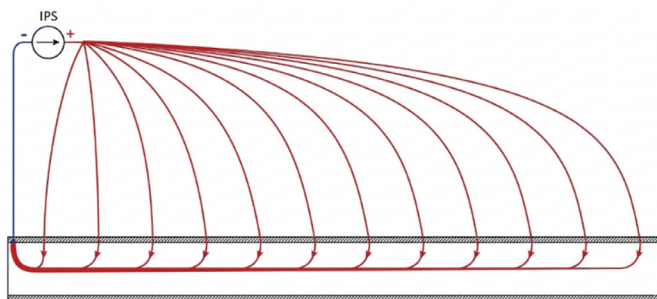
2.6. Rozpływ prądów ochrony katodowej

Analiza jednostkowej rezystancji przejścia (r_{co}) jest kluczowa dla zrozumienia zjawiska rozptyłu prądów ochrony katodowej wzdłuż rurociągu, którego ogólny mechanizm zilustrowano na rys. 7. Zgodnie z modelem drabinkowym, prąd wprowadzany do konstrukcji z uziomu anodowego nie rozkłada się równomiernie, lecz ulega tłumieniu wraz ze wzrostem odległości od punktu drenażu. Skala tego tłumienia zależy bezpośrednio od relacji między rezystancją metalu rury a jednostkową rezystancją przejścia izolacji.

W przypadku wysokiej wartości r_{co} , izolacja stanowi skuteczną barierę dla prądu, co wymusza jego przepływ na znaczne odległości wzdłuż osi rurociągu. Dzięki temu pojedyncza stacja ochrony katodowej jest w stanie spolaryzować bardzo długi odcinek konstrukcji. Jeśli jednak jednostkowa rezystancja przejścia ulega obniżeniu – czy to na skutek starzenia się powłoki, czy obecności defektów, powoduje to:

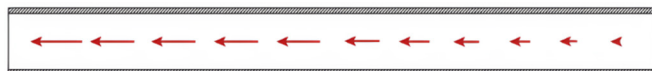
- Skrócenie zasięgu ochrony. Większość prądu wypływa w pobliżu źródła, pozostawiając dalsze odcinki rurociągu niedostatecznie spolaryzowane (niedochronione).
- Niejednorodność potencjału. W miejscach o niskim r_{co} dochodzi do gwałtownego wzrostu gęstości prądu, co może prowadzić do zjawiska nadpolaryzacji i uszkodzeń powłoki, takich jak jej odspojenie na skutek pęcherzenia katodowego [9].
- Ekranowanie elektryczne. Lokalne anomalie w rozptywie prądu mogą maskować mniejsze uszkodzenia izolacji znajdujące się w sąsiedztwie dużych defektów.

Zależność tę opisuje stała propagacji rurociągu, która wskazuje, że im wyższa jednostkowa rezystancja przejścia (r_{co}), tym bardziej ekonomiczny i stabilny staje się system ochrony katodowej, zapewniając bezpieczny rozkład potencjałów na całej długości obiektu.



Rys. 7. Rozpływ prądów ochrony katodowej (opracowanie własne)
Fig. 7. Cathodic protection current distribution (own elaboration)

Kluczowym elementem wyznaczania rezystancji przejścia analizowanej powłoki jest gradient prądu powrotnego do stacji ochrony katodowej (SOK/CPS). Analiza spadku natężenia prądu pozwala na precyzyjne określenie rezystancji badanego odcinka rurociągu, co jest niezbędne do rzetelnej oceny stanu technicznego izolacji. Wartości prądu powracającego do SOK przedstawiono na rys. 8.



Rys. 8. Przyrost prądów ochrony katodowej powracających do stacji SOK (opracowanie własne)
Fig. 8. Increase in cathodic protection currents returning to the CP Station (own elaboration)

2.7. Pomiary prądu metodą Current Span w badanym odcinku rurociągu

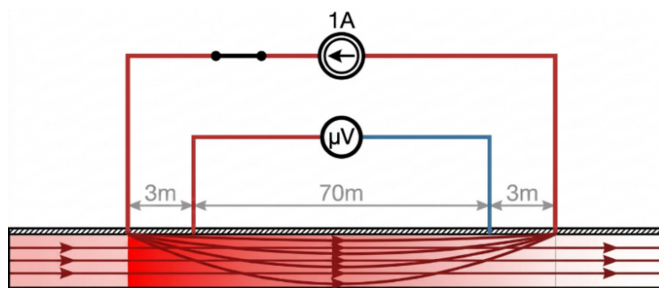
W technice ochrony katodowej pomiar natężenia prądu płynącego wzdłuż rurociągu jest kluczowy dla lokalizacji uszkodzeń izolacji oraz oceny efektywności systemu. Jedną z najdokładniejszych metod jest wykorzystanie samego odcinka gazociągu jako bocznika (rezystora pomiarowego), co określa się mianem odcinka pomiarowego spadku napięcia, tzw. PIs (ang. *Current Span* – CS).

Metoda ta opiera się na prawie Ohma. Stalowy rurociąg posiada określoną, choć bardzo niską, rezystancję wzdłużną (R_L). Jeśli przez rurociąg płynie prąd ochrony katodowej (I), to na mierzonym odcinku o długości (L) powstaje niewielki spadek napięcia (ΔU) [10]. Stosujemy wzór (3):

$$I = \frac{\Delta U}{R_L} \quad (3)$$

2.7.1. Układ pomiarowy

Aby wykonać pomiar, niezbędne są cztery wyprowadzenia kablowe zainstalowane na gazociągu w dwóch punktach oddalonych od siebie o określoną odległość. Konfigurację tego układu czteropunktowego, służącego do wyznaczania stałej kalibracji, przedstawiono na rys. 9. Para wewnętrzna służy do pomiaru spadku napięcia (ΔU). Para zewnętrzna służy do kalibracji odcinka poprzez zadanie prądu kalibracji.



Rys. 9. Wyznaczenie stałej kalibracji (opracowanie własne na podstawie [10])
Fig. 9. Determination of the calibration constant (adapted from [10])

2.7.2. Procedura pomiarowa

Pomiar natężenia prądu ochrony katodowej odbywa się w dwóch etapach:

- **Kalibracja** (wyznaczenie rezystancji odcinka). Ponieważ rezystancja stali zależy od gatunku rury, grubości ścianki i temperatury, nie wylicza się jej tylko teoretycznie. Przez kable zewnętrzne wymusza się przepływ znanego prądu z zewnętrznego źródła i mierzy zmianę spadku napięcia na kablach wewnętrznych. Dzięki temu wyznacza się współczynnik kalibracji (stała kalibracji K) (np. ile Amperów odpowiada 1 μV spadku).
- **Pomiar** prądu naturalnego. Po skalibrowaniu odcinka, mierzy się rzeczywisty spadek napięcia wywołany wyłącznie przez system ochrony katodowej. Korzystając z wyznaczonego wcześniej współczynnika, przelicza się μV na rzeczywiste natężenie prądu płynącego w rurze.

2.7.3. Stała kalibracyjna (K)

W metodzie spadku napięcia na odcinku rurociągu (ang. *Current Span*), kluczowym parametrem jest stała kalibracji (K). Określa ona relację między mierzonym spadkiem napięcia a rzeczywistym natężeniem prądu płynącego w rurze. Warto zauważyć, że stała ta jest w istocie przewodnością elektryczną danego odcinka gazociągu. Natomiast wzór na jej wyznaczenie to:

$$I = K \cdot \Delta U \quad (4)$$

gdzie:

- I – natężenie prądu, A
- K – stała kalibracji, S
- ΔU – zmierzony spadek napięcia, V

Wyznaczenie stałej w Siemensach pozwala na proste i szybkie przeliczanie wyników pomiarowych: wystarczy pomnożyć odczyt z woltomierza przez stałą kalibracji, aby uzyskać dokładną wartość prądu ochrony katodowej. Metodę wyznaczania stałej kalibracji K przedstawioną na rys. 9 i opisuje wzór (5). Czerwony gradient na schemacie ilustruje relację między prądem ochrony a prądem kalibracyjnym, pozwalając na wizualne porównanie ich wielkości.

$$K = \frac{I_{SKAL}}{U_{SKAL}} \quad (5)$$

gdzie:

- K – stała kalibracji, przewodność mierzonego odcinka gazociągu, S
 I_{SKAL} – zadawany prąd skalowania o znanej wartości (np. 1 A), A
 U_{SKAL} – zmierzony spadek napięcia dla odcinka rurociągu, V

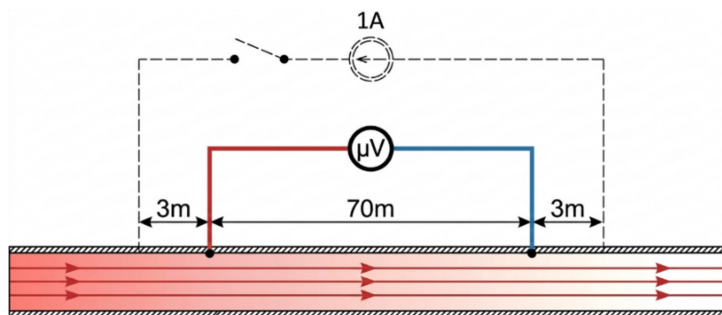
2.7.4. Pomiar natężenia prądu ochrony katodowej

Pomiar natężenia prądu ochrony katodowej (I_{PIs}) metodą spadku napięcia na odcinku rurociągu (PIs) opiera się na wykorzystaniu stałej kalibracji. Jest to parametr indywidualny dla każdego punktu pomiarowego, który uwzględni geometrię rury oraz właściwości fizyczne stali. Sposób wyznaczania prądu ochrony dla danego odcinka gazociągu, wraz z odpowiednim wzorem matematycznym (6), przedstawiono na rys. 10.

$$I_{PIs} = U_{PIs} \cdot K \quad (6)$$

gdzie:

- I_{PIs} – prąd mierzony w punkcie pomiarowym PIs , A
 U_{PIs} – napięcie mierzone w punkcie pomiarowym PIs , V
 K – stała kalibracji, S



Rys. 10. Pomiar spadku napięcia (opracowania własne na podstawie [10])

Fig. 10. Voltage drop measurement (adapted from [10])

2.8. Obliczenie rezystancji przejścia

2.8.1. Pomiar prądu ochrony katodowej pobieranego przez odcinek rurociągu pomiędzy punktami PIs

W celu określenia ubytku prądu ochrony katodowej na wybranym odcinku rurociągu, ograniczonym punktami pomiarowymi PIs (ang. CS), stosuje się dwukierunkową metodę pomiarową. Polega ona na jednoczesnej analizie natężenia prądu płynącego od stacji ochrony katodowej (kierunek malejący) oraz prądu powracającego (kierunek rosnący). Wyznaczona różnica reprezentuje całkowity prąd pobierany przez analizowany odcinek i stanowi bezpośredni wskaźnik kondycji powłoki izolacyjnej oraz jej ewentualnych defektów. Obliczenia wykonuje się według zależności (7):

$$\Delta I = I_{PIs_i}^{mal} - I_{PIs_{i-1}}^{ros} \quad (7)$$

gdzie:

- ΔI – zmiana (różnica) natężenia prądu, A
 $I_{PIs_i}^{mal}$ – natężenie prądu zmierzone w punkcie PIs w kierunku malejącym, A

- I_{PIs}^{ros} – natężenie prądu zmierzone w punkcie PIs w kierunku rosnącym, A
 i – nr punktu pomiarowego

W celu uzyskania rzeczywistych wartości prądu ochrony katodowej, kluczowe jest wyeliminowanie składowych tła pomiarowego. Aby skompensować zjawisko Seebecka [11] (powstawanie sił termoelektrycznych na złączach różnych metali przy różnicy temperatur gruntu i otoczenia), a także wpływ zewnętrznych prądów błądzących [12], indukcji od równoległych linii elektroenergetycznych AC oraz naturalnych prądów ogniwo korozyjnych [2], należy wyznaczyć czystą składową prądu ochrony. W tym celu od prądu mierzonego w stanie włączonym odejmuje się prąd spoczynkowy, rejestrowany przy wyłączonej stacji ochrony katodowej, zgodnie z zależnością (8):

$$I_{PIs} = I_{ON} - I_{OFF} \quad (8)$$

gdzie:

- I_{PIs} – natężenie prądu zmierzone w punkcie PIs , A
 I_{ON} – natężenie prądu zmierzone przy włączonym prądzie ochrony katodowej, A
 I_{OFF} – natężenie prądu zmierzone po wyłączeniu prądu ochrony katodowej, A

2.8.2. Wyznaczenie różnicy potencjałów ΔE

W celu pełnej oceny parametrów ochrony konieczne jest również określenie skoku potencjału. Definiuje się go jako wartość bezwzględną różnicy potencjałów załączeniowego i wyłączeniowego, co opisuje zależność (9):

$$\Delta E = |E_{ON(sr)} - E_{OFF(sr)}| \quad (9)$$

gdzie:

- ΔE – różnica potencjałów załączeniowy/wyłączeniowy, V
 $E_{ON(sr)}$ – średni potencjał załączeniowy dla mierzonego odcinka, V
 $E_{OFF(sr)}$ – średni potencjał wyłączeniowy dla mierzonego odcinka, V

2.8.3. Obliczenie rezystancji przejścia R_{CO}

Aby wyznaczyć wartość rezystancji przejścia R_{CO} skorzystano ze zależności prawa Ohma wg wzoru (10):

$$R_{CO} = \Delta E / \Delta I \quad (10)$$

gdzie:

- R_{CO} – rezystancja przejścia, Ω
 ΔE – różnica potencjałów załączeniowy/wyłączeniowy, V
 ΔI – zmiana (różnica) natężenia prądu, A

2.8.4. Wynik końcowy – obliczenie jednostkowej rezystancji przejścia r_{co}

Kolejnym etapem jest wyznaczenie rezystancji przejścia w przeliczeniu na $1 m^2$. W tym celu należy wyznaczyć pole powierzchni zewnętrznej rurociągu:

$$S = \pi \cdot d \cdot l \quad (11)$$

gdzie:

- S – pole powierzchni zewnętrznej rurociągu, m^2
- d – średnica zewnętrzna rurociągu, m
- l – długość odcinka rurociągu, m

Rezystancja przejścia r_{co} dla $1 m^2$ jest to iloczyn rezystancji przejścia R_{co} i pola powierzchni zewnętrznej rurociągu, dla przypomnienia, obliczenia bazują na wzorze (2). Tak obliczona rezystancja jednostkowa r_{co} wyrażona jest w Ohmach (Ω).

3. Metodyka wykonania pomiarów

3.1. Punkt pomiaru natężenia prądu (PIs)

Na rys. 11 przedstawiono rzeczywisty punkt pomiarowy typu PIs zainstalowany na gazociągu wysokiego ciśnienia DN1000. Punkt umożliwia pomiar metodą czteropunktową (układ Kelvina) [13], co eliminuje wpływ rezystancji przewodów pomiarowych. GD-1 oraz GD₇₀-4 (czerwone) to zaciski prądowe (zewnętrzne). Służą do podłączenia zewnętrznego źródła prądu podczas kalibracji odcinka pomiarowego (wyznaczania stałej K). GP-2 oraz GP₇₀-3 (czarne) to zaciski napięciowe (wewnętrzne). Służą do pomiaru spadku napięcia ΔU wywołanego przepływem prądu ochrony lub prądu kalibracyjnego. Indeks „70” oznacza odległość 70 metrów między punktami pomiarowymi. Eo-5 to punkt podłączenia elektrody odniesienia ($Cu/CuSO_4$), służący do pomiaru potencjału rurociągu względem ziemi.

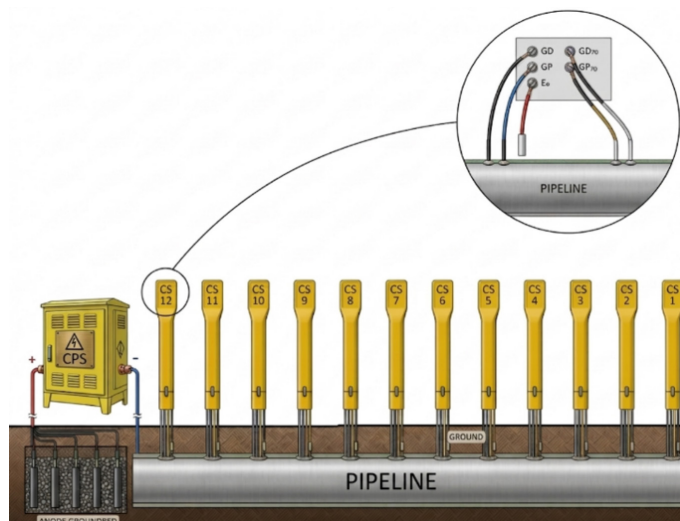


Rys. 11. Pomiar spadku napięcia (materiały GAZ-SYSTEM)

Fig. 11. Voltage drop measurement (GAZ-SYSTEM materials)

3.2. Organizacja punktów PIs

Schemat (rys. 12) ilustruje system monitoringu ochrony katodowej rurociągu, oparty na 12 punktach pomiarowych typu PIs (CS). Zastosowanie odpowiednio gęstej sieci punktów pozwala na stworzenie pełnego profilu prądowego rurociągu, co umożliwia precyzyjne monitorowanie efektywności ochrony oraz szybkie reagowanie na pojawiające się ogniska korozji.



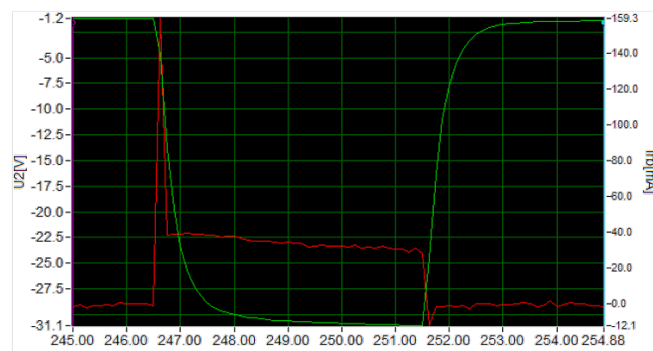
Rys. 12. Organizacja punktów PIs (opracowanie własne)

Fig. 12. Arrangement of CS measurement points (own elaboration)

3.3. Aparatura pomiarowa dla punktów PIs (CS)

Do precyzyjnego wyznaczania natężenia prądu ochrony katodowej oraz kalibracji polowej stosuje się wielokanałowe rejestratory współpracujące z przystawkami wymuszającymi stabilny prąd testowy. Kluczowe dla dokładności pomiaru tak niskich spadków napięcia jest zastosowanie aparatury o bardzo wysokiej impedancji wejściowej, co minimalizuje obciążenie mierzonego obwodu, oraz przetworników analogowo-cyfrowych (A/C) o wysokiej rozdzielczości. Zapewnia to stabilną rejestrację danych w środowisku o silnych zakłóceniach, w tym w obecności zewnętrznych prądów błądzących. Na podstawie wygenerowanego impulsu prądowego i zmierzonej zmiany potencjału układu, wyznaczana jest rzeczywista przewodność mierzonego odcinka gazociągu, stanowiąca jego stałą kalibracji.

Proces ten wspiera dedykowane oprogramowanie inżynierskie, służące do komputerowej analizy i automatyzacji obliczeń. Aplikacja wyznacza stałą kalibracji w Siemensach [S] poprzez zaawansowaną analizę regresji, korelując wymuszony prąd testowy ze zmierzonym spadkiem napięcia na rurociągu. Wbudowane algorytmy skutecznie eliminują szumy tła, a na podstawie wbudowanych wzorów przeliczają wartości miliwoltowe na rzeczywiste natężenie prądu płynącego w rurze. System zarządza bazą punktów PIs i archiwizuje dane, ułatwiając monitorowanie trendów i ocenę stabilności parametrów elektrycznych, co jest niezbędne do rzetelnej oceny stanu technicznego powłok wysokiej szczelności (*high-integrity coatings*). Zaprezentowana analiza opiera się na danych z punktu PIs (CS) i ilustruje korelację między natężeniem prądu ochrony katodowej a spadkiem napięcia na mierzonej odcinku (rys. 13). Wykorzystując wyznaczoną wcześniej stałą kalibracji, program automatycznie przelicza zarejestrowane wartości napięciowe na rzeczywisty prąd płynący w konstrukcji.



Rys. 13. Związek między natężeniem prądu ochrony katodowej (kolor czerwony) i spadkiem napięcia (kolor zielony) - zrzut z ekranu
Fig. 13. Relationship between cathodic protection current (red) and voltage drop (green) – screenshot

4. Wyniki pomiarów

W tabeli 1 zestawiono dane pomiarowe z 2025 roku oraz wyniki obliczeń dla badanego odcinka gazociągu o długości ponad 28 km. Dane te służą do oceny stanu powłoki izolacyjnej oraz efektywności ochrony katodowej. **Parametry wejściowe:** potencjały i prądy w trybie załączeniowym (E_{ON} , I_{ON}) oraz wyłączeniowym (E_{OFF} , I_{OFF}). Wartości obliczone: różnice (ΔE , ΔI), stała skalowania (K) oraz jednostkowa rezystancja powłoki (r_{CO}). Warunki pomiaru: badanie zrealizowano przy celowo obniżonym poten-

cjale ochrony. Pozwoliło to uzyskać wyższe gęstości prądowe, co zwiększyło precyzję obliczeń i ułatwiło wykrywanie drobnych uszkodzeń izolacji.

5. Analiza wyników

5.1. Ocena parametrów ochrony i ciągłości powłoki izolacyjnej

Analiza trasy rurociągu Pls (CS) 1–12 wykazuje stabilne profile potencjałów (E_{ON} , E_{OFF}) oraz wysoką szczelność powłok wysokiej szczelności (*high-integrity coatings*) na większości badanych sekcji (r_{CO} rzędu $10^8 \Omega \cdot m^2$). Zidentyfikowano jednak trzy istotne odchylenia:

- Krytyczny defekt Pls (CS) 4–5: skokowy, gwałtowny pik poboru prądu ($\Delta I = 92,89 \text{ mA}$) oraz drastyczny spadek rezystancji przejścia ($r_{CO} = 2,60 \cdot 10^6 \Omega \cdot m^2$). Krytyczny stan izolacji w tym miejscu bezsprzecznie potwierdzają dane z tabeli oraz wykres na rys. 14.
- Potencjalna usterka Pls (CS) 1–2: niewielka anomalia ($\Delta I = 10,90 \text{ mA}$, $r_{CO} = 3,36 \cdot 10^7 \Omega \cdot m^2$), która może sugerować drobne uszkodzenie lub problem z monoblokiem (wymagana dodatkowa diagnostyka).
- Wpływ prądów błądzących: zjawisko to jest prawdopodobną przyczyną ujemnych wartości spadku natężenia prądu na odcinkach Pls (CS) 8–9 oraz Pls (CS) 3–4.

Tabela 1. Wyniki pomiarów w roku 2025 (opracowanie własne na podstawie danych GAZ-SYSTEM)
Table 1. Measurement results in 2025 (own elaboration based on GAZ-SYSTEM data)

Punkt pomiarowy	Kilometr [m]	Kierunek	Stała skalowania K [S]	E_{on} [V]	I_{on} [mA]	E_{off} [V]	I_{off} [mA]	ΔE [V]	ΔI [mA]	R_{co} [Ω]	S [m^2]	r_{co} [Ωm^2]
Pls (CS) 12	28117	malejąco	4459,36	-30,87	91,96	-1,24	-1,33					
Pls (CS) 11	26205	rosnąco	4138,73	-30,93	92,08	-1,23	-1,19	29,67	0,02	1483250,00	6099,74	9,05E+09
Pls (CS) 11	26205	malejąco	4138,73	-30,88	98,85	-1,19	6,15	29,69	1,30	22834,62	9267,65	2,12E+08
Pls (CS) 10	23300	rosnąco	4102,47	-30,92	79,29	-1,24	-12,11					
Pls (CS) 10	23300	malejąco	4102,47	-30,94	74,75	-1,27	-16,76	29,65	1,45	20444,83	9057,09	1,85E+08
Pls (CS) 9	20461	rosnąco	3980,97	-30,86	110,61	-1,24	20,55					
Pls (CS) 9	20461	malejąco	3985,20	-30,73	142,81	-1,25	14,40	29,49	-1,23	23975,61	8173,39	1,96E+08
Pls (CS) 8	17899	rosnąco	4371,50	-30,75	102,99	-1,25	-26,65					
Pls (CS) 8	17899	malejąco	4371,50	-30,73	111,53	-1,24	-16,84	29,49	4,10	7192,68	8505,18	6,12E+07
Pls (CS) 7	15233	rosnąco	2790,77	-30,73	115,18	-1,24	-9,09					
Pls (CS) 7	15233	malejąco	2790,77	-30,89	115,99	-1,24	-8,21	29,65	0,43	68941,86	7158,90	4,94E+08
Pls (CS) 6	12989	rosnąco	3074,61	-30,96	112,98	-1,32	-10,79					
Pls (CS) 6	12989	malejąco	3074,61	-30,92	122,88	-1,32	-1,15	29,51	1,28	23050,78	2612,81	6,02E+07
Pls (CS) 5	12170	rosnąco	4169,94	-30,67	121,42	-1,26	-1,33					
Pls (CS) 5	12170	malejąco	4171,78	-30,83	86,16	-1,23	-28,23	29,50	92,89	317,58	8176,59	2,60E+06
Pls (CS) 4	9607	rosnąco	4160,07	-30,66	21,30	-1,26	-0,20					
Pls (CS) 4	9607	malejąco	4160,07	-30,49	19,47	-1,26	-1,47	29,24	-0,52	56221,15	8690,21	4,89E+08
Pls (CS) 3	6883	rosnąco	4110,38	-30,48	21,17	-1,24	-0,29					
Pls (CS) 3	6883	malejąco	4110,38	-30,40	19,32	-1,24	-1,37	29,03	0,17	170764,71	8307,38	1,42E+09
Pls (CS) 2	4279	rosnąco	3128,81	-30,33	17,98	-1,43	-2,54					
Pls (CS) 2	4279	malejąco	3128,81	-30,53	15,27	-1,24	1,64	29,34	11,90	2465,55	13619,13	3,36E+07
Pls (CS) 1	10	rosnąco	4295,46	-30,60	0,85	-1,21	-0,88					

Tabela 2. Zestawienie wartości natężenia prądu ochrony katodowej (ΔI) (opracowanie własne na podstawie danych GAZ-SYSTEM)

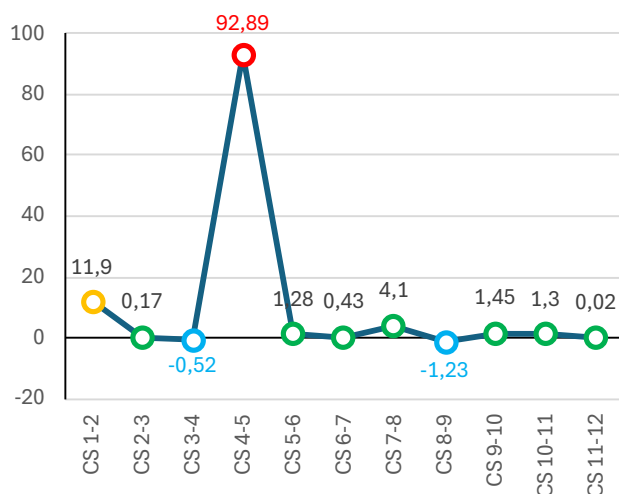
Table 2. Cathodic protection current intensity (ΔI) (own elaboration based on GAZ-SYSTEM data)

Odcinek	ΔI [mA]	Obserwacja
CS 1-2	11,9	drobne uszkodzenie
CS 2-3	0,17	
CS 3-4	-0,52	wpływ prądów błądzących (?)
CS 4-5	92,89	krytyczny stan izolacji
CS 5-6	1,28	
CS 6-7	0,43	
CS 7-8	4,1	
CS 8-9	-1,23	wpływ prądów błądzących (?)
CS 9-10	1,45	
CS 10-11	1,3	
CS 11-12	0,02	



Rys. 15. Defekt izolacji gazociągu (materiały GAZ-SYSTEM)

Fig. 15. Defect in a gas pipeline coating (GAZ-SYSTEM materials)



Rys. 14. Rozkład natężenia prądu ochrony katodowej pobieranego na poszczególnych odcinkach rurociągu (opracowanie własne na podstawie danych GAZ-SYSTEM)

Fig. 14. Distribution of cathodic protection current drawn along individual pipeline sections (own elaboration based on GAZ-SYSTEM data)

5.2. Potwierdzenia uszkodzenia powłoki izolacyjnej

W celu weryfikacji anomalii na odcinku Pls 4–5 (wzrost prądu do 92,89 mA), wykonano odkrywkę kontrolną. Potwierdziła ona poważne uszkodzenie mechaniczne powłoki, w postaci śladu po świdrze, odsłaniające stalowy korpus rury, rysunek 15. Defekt powstał na skutek bezwypokowego odwiertu horyzontalnego, zrealizowanego przez stronę trzecią. Rozległy kontakt stali z gruntem wytworzył ognisko korozyjne o bardzo niskiej rezystancji przejścia ($r_{co} = 2,60 \Omega \cdot m^2$), co przełożyło się na intensywny pobór prądu. Sprawna lokalizacja usterki dowodzi wysokiej czułości zastosowanej metody, która skutecznie zapobiegła rozwojowi głębokiej korozji wżerowej. Przed zasypaniem wykopu wykonano renowację powłoki, a jej pełną szczelność zweryfikowano pomiarem DCVG (*Direct Current Voltage Gradient*).

6. Podsumowanie

Przeprowadzone badania na 28-kilometrowym odcinku gazociągu przesyłowego udowadniają, że analiza jednostkowej rezystancji przejścia (r_{co}) jest skutecznym i precyzyjnym narzędziem w diagnostyce stanu technicznego powłok o wysokiej szczelności (*high-integrity coatings*). Implementacja modelu elektrycznego rurociągu jako linii długiej o parametrach rozłożonych, w połączeniu z empirycznymi pomiarami spadków napięcia metodą Current Span (Pls/CS), umożliwiła rzetelną ocenę rozkładu potencjałów i natężenia prądu ochrony katodowej bez konieczności masowej ingerencji w strukturę gruntu.

Na podstawie zgromadzonych danych potwierdzono wysoką szczelność dielektryczną izolacji na większości analizowanej trasy, gdzie wartości r_{co} utrzymywały się na bezpiecznym poziomie powyżej projektowanego $5,9 \cdot 10^7 \Omega \cdot m^2$ [14]. Najważniejszym osiągnięciem weryfikującym opisaną metodę było wytypowanie anomalii na odcinku pomiarowym Pls (CS) 4–5. Rejestracja gwałtownego wzrostu poboru prądu ochrony (ΔI) oraz drastyczny spadek jednostkowej rezystancji przejścia (r_{co}) bezsprzecznie wskazywały na powstanie defektu izolacji. Wykonana odkrywka kontrolna w pełni potwierdziła wskazania analityczne, ujawniając rozległe uszkodzenie mechaniczne powłoki wywołane przewiertem horyzontalnym zrealizowanym przez podmiot trzeci.

Zastosowane podejście, opierające się na korelacyjnej analizie natężenia prądu ochrony katodowej płynącego ścianką rurociągu oraz jednostkowej rezystancji powłoki wykazuje bardzo wysoką czułość diagnostyczną. Metoda ta pozwala nie tylko na obiektywną ocenę równomiernego starzenia się izolacji, ale przede wszystkim na natychmiastową detekcję krytycznych defektów strukturalnych. Wdrożenie wyznaczania parametru r_{co} do zaawansowanych procedur monitoringu pozwala na lokalizację ognisk korozyjnych z dużą dokładnością, co umożliwia podjęcie prewencyjnych działań naprawczych, zanim dojdzie do uszkodzenia infrastruktury.

7. Perspektywy rozwoju modeli diagnostycznych i analizy dynamiczne

Obiecującym kierunkiem dalszego rozwoju przedstawionego modelu drabinkowo-różniczkowego jest przejście od statycznej analizy rezystancyjnej do badania dynamicznej odpowiedzi rurociągu, traktowanego jako pełna linia długa o charakterze *RLC*. Uwzględnienie parametrów reaktywnych – wzdłużnej indukcyjności stali (*L*) oraz poprzecznej pojemności granicy faz metal-grunt i samej powłoki (*C*) – otwiera zupełnie nowe możliwości diagnostyczne w stanach nieustalonych. Analiza dynamiczna, bazująca na odpowiedzi impulsowej układu lub metodach spektroskopii impedancyjnej w szerokim zakresie częstotliwości, pozwoliłaby na precyzyjne odseparowanie czysto omowych spadków napięcia od procesów relaksacji ładunku na pojemności rura-ziemia.

Rozwój modeli w tym kierunku ma kluczowe znaczenie dla eliminacji zakłóceń wywoływanych przez prądy błądzące oraz indukowane fale elektromagnetyczne, generowane przez sąsiadujące linie elektroenergetyczne wysokiego napięcia. Ponadto, wyznaczenie dynamicznej charakterystyki częstotliwościowej gazociągu umożliwiłoby opracowanie zaawansowanych algorytmów numerycznych zdolnych do identyfikacji mikrouszkodzeń izolacji 3LPE/3LPP na podstawie analizy odbicia fali sygnałowej (metoda reflektometrii czasowej TDR). Implementacja pełnego modelu *RLC* w systemach monitoringu pozwoliłaby na bezprecedensowy wzrost dokładności lokalizacji defektów bez konieczności fizycznego próbkowania potencjałów w tak wielu punktach terenowych.

8. Literatura

- [1] Pourbaix, M. (1974). *Atlas of Electrochemical Equilibria in Aqueous Solutions* (2nd ed.). National Association of Corrosion Engineers.
- [2] Číp, J., Dědina, T., & Mičko, F. (2020). *Ochrona katodowa w teorii i praktyce*. Materiały ze szkolenia dla personelu ochrony katodowej zorganizowanego przez firmę ATEKO, Chałupki, 9–13 grudnia 2024 r.
- [3] Miszczyk, A., Szociński, M., & Darowicki, K. (2022). *Powłoki malarskie w ochronie przeciwkorozyjnej. Zasady stosowania i kontrola jakości*. Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej
- [4] Żakowski, K., & Darowicki, K. (2011). *Ochrona katodowa*. Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej.
- [5] International Organization for Standardization. (2015). *Petroleum, petrochemical and natural gas industries—Cathodic protection of pipeline systems—Part 1: On-land pipelines* (ISO Standard No. 15589-1:2015). International Organization for Standardization
- [6] Bolkowski, S. (2017). *Teoria obwodów elektrycznych*. Wydawnictwo Naukowe PWN
- [7] PKN. (2005). PN-EN 13509:2005. Metody pomiarowe w ochronie katodowej. *Polski Komitet Normalizacyjny*
- [8] International Organization for Standardization. (2016). ISO 21809-3:2016. Petroleum and natural gas industries—External coatings for buried or submerged pipelines used in pipeline transportation systems—Part 3: Field joint coatings. International Organization for Standardization
- [9] Stochaj, P. (2012). Zastosowanie korozymetrii rezystancyjnej w odniesieniu do kryteriów ochrony katodowej gazociągów. *Nafta-Gaz*, 68(5), 298-305
- [10] Hanasz, M. (2009). POMIAR PRĄDU w ocenie powłoki rurociągu. *Ochrona przed Korozją*, (8), 308-313
- [11] Snyder, G. J., & Toberer, E. S. (2008). Complex thermoelectric materials. *Nature Materials*, 7(2), 105-114. <https://doi.org/10.1038/nmat2090>
- [12] Stochaj, P. (2013). Prądy błądzące jako źródło zagrożenia korozyjnego gazociągów stalowych. *Nafta-Gaz*, 69(9), 683-689
- [13] Schroder, D. K. (2006). *Semiconductor material and device characterization* (3rd ed.). Wiley-IEEE Press.
- [14] GAZ-SYSTEM S.A. (2021). *Standard bezpieczeństwa technicznego* [Dokument wewnętrzny, niepublikowany].



**Politechnika
Wrocławska**

**ŚWIATOWY
KONGRES
ABSOLWENTÓW
POLITECHNIKI WROCŁAWSKIEJ**

**16-17
października
2026**



Alumni PWr
Stowarzyszenie Absolwentów
Politechniki Wrocławskiej








ŁĄCZY NAS WIĘCEJ NIŻ STUDIA

Porównanie sposobów transportu ścieków z zastosowaniem metod racjonalizacji rozwiązań

Comparison of wastewater transport methods using solution rationalization methods

Weronika Patelska¹, Tomasz Schiller^{1*} 

¹ Wydział Inżynierii Środowiska i Energetyki, Politechnika Poznańska

* Kontakt / Correspondence: tomasz.schiller@put.poznan.pl

Streszczenie:

Celem pracy jest prezentacja metody wskazania racjonalnego sposobu transportu ścieków oraz jej sprawdzenie na wybranym przykładzie. W pracy przeprowadzono analizę czterech wariantów transportu ścieków. Dokonano analiz SWOT oraz kosztów. Stwierdzono, że o racjonalności systemu transportu ścieków decydują przede wszystkim długość sieci, liczba urządzeń tłocznych, ukształtowanie terenu oraz możliwość wykorzystania istniejącej infrastruktury. Uzyskane wyniki potwierdziły przydatność zastosowanych metod racjonalizacji rozwiązań jako narzędzi wspomagających podejmowanie decyzji projektowych w zakresie planowania systemów kanalizacyjnych.

Słowa kluczowe: transport ścieków, system kanalizacyjny, analiza SWOT, analiza kosztów, racjonalizacja rozwiązań projektowych

Abstract:

The aim of this study was to present a method for determining the efficient way to transport wastewater and to test it using a selected example. This study analyzed four wastewater transport options. SWOT and cost analyses were performed. It was found that the rationality of a wastewater transport system is determined primarily by the length of the network, the number of pumping stations, the topography of the area, and the possibility of utilizing existing infrastructure. The results obtained confirmed the usefulness of the methods used to optimize solutions as tools to support design decisions in the planning of sewer systems.

Keywords: wastewater transport, sewerage system, SWOT analysis, cost analysis, rationalization of design solutions

1. Wstęp

Rozwój obszarów zurbanizowanych oraz rosnące wymagania w zakresie ochrony środowiska sprawiają, że systemy kanalizacyjne potrzebują doskonalenia, aby zapewnić efektywność transportu ścieków z miejsca ich powstawania do obiektów oczyszczania. W praktyce inżynierskiej często pojawia się konieczność transportu ścieków na większe odległości. W takich przypadkach niezbędne jest rozważenie różnych wariantów odprowadzania ścieków (transport grawitacyjny, ciśnieniowy oraz podciśnieniowy).

2. Przegląd metod wspomagających podejmowanie decyzji

Podejmowanie decyzji stanowi jeden z podstawowych elementów procesu planowania, projektowania oraz zarządzania sys-

temami infrastrukturalnymi. W przypadku infrastruktury technicznej decyzje dotyczą najczęściej wyboru racjonalnego rozwiązania spośród kilku możliwych wariantów projektowych, które różnią się parametrami technicznymi, kosztami realizacji, niezawodnością eksploatacyjną oraz oddziaływaniem na środowisko [17]. Współczesne inwestycje infrastrukturalne cechują się znaczną złożonością i wymagają uwzględnienia wielu różnych aspektów funkcjonowania, co powoduje, że w proces podejmowania decyzji warto włączyć metody analityczne wspomagające wybór optymalnego wariantu [16].

Decyzje podejmowane w inżynierii środowiska mają zwykle charakter długoterminowy i wiążą się z istotnymi nakładami finansowymi, a ich konsekwencje mogą wpływać na funkcjonowanie systemu przez wiele lat. Dlatego znaczenie ma stosowanie metod umożliwiających systematyczną analizę dostępnych wariantów i racjonalne uzasadnienie wyboru danego rozwiązania [42]. Piśmiennictwo dotyczące podejmowania decyzji pokazuje

wiele metod wspomagających proces decyzyjny:
Analiza kosztów cyklu życia (LCC – Life Cycle Cost) to jedna z podstawowych metod racjonalizacji rozwiązań technicznych [15]. Pozwala na dokonanie racjonalnego wyboru wariantu inwestycyjnego, szczególnie w przypadku systemów wodno-kanalizacyjnych, które charakteryzują się długim okresem eksploatacji [27]. Uwzględnia koszty operacyjne, konserwacyjne, napraw oraz związane z wymianą i likwidacją obiektu po zakończeniu okresu eksploatacji [32, 18]. Przykładowe kategorie kosztów w systemach transportu ścieków przedstawiono w tabeli 1.

Tabela 1. Przykłady kosztów w systemach transportu ścieków (opracowanie własne na podstawie [15])
Table 1. Examples of costs in wastewater transportation systems (author's own analysis based on [15])

Rodzaj kosztu	Przykłady w systemach transportu ścieków
Koszty inwestycyjne (CAPEX)	Wykonanie wykopów i robót ziemnych. Zakup i montaż rurociągów. Budowa przepompowni ścieków.
Koszty eksploatacyjne (OPEX)	Koszty obsługi technicznej. Monitoring i sterowanie systemem. Bieżące utrzymanie sieci.
Koszty remontów i utrzymania	Czyszczenie kanałów i usuwanie zatorów. Naprawa uszkodzonych przewodów lub wymiana zużytych elementów. Modernizacja przepompowni ścieków.
Koszty energii	Zasilanie pomp w systemach tłocznych. Praca urządzeń sterujących i automatyki. Transport ścieków na duże odległości.
Koszty środowiskowe	Emisja gazów cieplarnianych związana ze zużyciem energii. Ryzyko zanieczyszczenia gleby i wód w przypadku awarii. Oddziaływanie inwestycji na ekosystemy.

Analiza kosztów i korzyści (CBA – Cost-Benefit Analysis) porównuje koszty i korzyści realizacji przedsięwzięcia w celu określenia opłacalności ekonomicznej. Wykorzystywana w projektach infrastrukturalnych, w których konieczne jest jednoczesne uwzględnienie nakładów finansowych oraz szeroko rozumianych efektów społecznych i środowiskowych [10, 40]. Metoda ta, poprzez dyskontowanie umożliwia porównanie kosztów i korzyści w różnych momentach czasu. W projektach infrastrukturalnych koszty inwestycyjne ponoszone są na początku, a korzyści pojawiają się w długim okresie eksploatacji [37].
Analiza wielokryterialna (MCDA – Multi-Criteria Decision Analysis) to grupa metod stosowanych w inżynierii środowiska i projektowaniu infrastruktury technicznej. Umożliwia jednoczesne uwzględnienie wielu kryteriów, często o wzajemnie sprzecznych wymaganiach, takich jak aspekty ekonomiczne, techniczne, środowiskowe oraz społeczne [1, 2, 17].
Analiza SWOT jest często stosowaną metodą jakościową umożliwiającą ocenę analizowanego problemu przez uporządkowanie i identyfikację czynników wewnętrznych i zewnętrznych wpływających na rozpatrywane rozwiązania [12, 34, 41]. W analizach technicznych SWOT może stanowić narzędzie wspomagające wybór racjonalnego wariantu, szczególnie na wstępnym etapie procesu decyzyjnego [23].
Analiza ryzyka to proces systematycznego identyfikowania, oceniania i zarządzania potencjalnymi zagrożeniami, które mogą

wpływać na funkcjonowanie systemów technicznych, organizacyjnych lub środowiskowych [19, 30]. W kontekście systemów wodociągowych i kanalizacyjnych analiza ryzyka obejmuje nie tylko awarie techniczne, ale także ryzyka środowiskowe i społeczne.
Benchmarking to metoda analizy porównawczej poprzez odniesienie do obiektów lub wartości referencyjnych. Identyfikuje różnice w efektywności technicznej, ekonomicznej i operacyjnej systemów [7, 33]. Podstawą są wskaźniki efektywności (KPI – Key Performance Indicators), które umożliwiają ilościową ocenę funkcjonowania systemów pod kątem kosztów operacyjnych, zużycia energii, niezawodności infrastruktury [11] w ujęciu technicznym, ekonomicznym i środowiskowym [25].

3. Metoda porównania rozwiązań

W niniejszej pracy zaproponowano stosunkowo prostą metodę, która może wspomóc proces decyzyjny. Pokazano również zastosowanie tej metody dla przykładowego systemu kanalizacyjnego, gdzie wybór technologii lub sposobu transportu ścieków wpływa zarówno na wysokość kosztów inwestycyjnych, jak i późniejsze koszty eksploatacyjne oraz oddziaływanie na środowisko naturalne [17].
Proponowana metoda zakłada dwa etapy analizy i jest ukierunkowana na porównanie wariantów systemu kanalizacyjnego służącego przesyłowi ścieków na większe odległości. Można ją zastosować w przypadku innych inwestycji infrastrukturalnych pod warunkiem dostosowania jej elementów do koncepcji, której ma służyć. Pokazano to opisując etapy metody.
Etap pierwszy: jakościowa analiza SWOT. W ramach analizy proponuje się ocenić następujące obszary funkcjonowania systemu:

- uwarunkowania techniczne realizacji inwestycji, w tym długość tras przesyłowych oraz liczba obiektów technologicznych (przepompowni),
- stopień trudności wykonawczej inwestycji wynikający z warunków terenowych oraz gruntowych,
- potencjalną awaryjność poszczególnych elementów infrastruktury,
- wpływ inwestycji na środowisko naturalne, w tym potencjalne ryzyko oddziaływania na wody gruntowe,
- możliwość rozbudowy i etapowania systemu w przyszłości,
- możliwość wykorzystania istniejącej infrastruktury.

Etap drugi: ilościowa analiza kosztów. W proponowanej metodzie, analiza obejmuje porównanie:
• kosztów inwestycyjnych budowy sieci, do których zaliczane są roboty ziemne, przewody, studzienki oraz przepompownie,
• kosztów eksploatacyjnych systemu, w szczególności kosztów związanych z energochłonnością.
W ramach analizy należy przyjąć jednakowe założenia projektowe dla wszystkich wariantów, aby zachować porównywalności wyników i racjonalność oceny poszczególnych rozwiązań. W analizowanym przypadku obejmuje to m.in. jednostkową ilość ścieków bytowych, współczynniki nierównomierności, minimalne spadki dna kanałów, dopuszczalne prędkości przepływu, parametry pracy przepompowni, okres analizy ekonomicznej oraz ceny energii elektrycznej.

3.1. Uproszczona analiza kosztów robót ziemnych, kosztów i własności materiałów

W ramach uproszczonej analizy kosztów robót ziemnych należy przyjąć jednostkowy koszt wykonania wykopu. W badanym przypadku przyjęto 32,50 zł/mb, co stanowi wartość uśrednioną na podstawie danych rynkowych oraz typowych stawek stosowanych w realizacji sieci kanalizacyjnych [46]. Wartość tę należy następnie skorygować o główne czynniki kosztotwórcze wpływające na rzeczywisty koszt wykonania robót [47]. W badanym przypadku uwzględniono wpływ warunków gruntowych, przyjmując dla wszystkich wariantów występowanie gruntu w postaci gliny zwałowej, co skutkowało zwiększeniem kosztu o 50%. Dodatkowo przyjęto, że głębokość wykopów na większości odcinków tras przekracza 1,5 m, co generowało wzrost kosztów o 40%. Średnica przewodów powyżej 160 mm powodowała zwiększenie kosztów o 30%. W przypadku lokalizacji robót uwzględniono prowadzenie sieci w pasie drogowym lub w nawierzchni asfaltowej, co skutkowało wzrostem kosztów o 100%. Należy zaznaczyć, że całkowity koszt robót ziemnych w rzeczywistości obejmuje nie tylko wykonanie wykopów, lecz również szereg dodatkowych czynności, takich jak transport i utylizacja urobku, wykonanie obsypki i zagęszczenia, rekultywacja terenu, odwodnienie wykopów czy odtworzenie nawierzchni asfaltowych. Elementy te wskazano jako składowe pełnego kosztu realizacji robót ziemnych i można je uwzględnić w miarę dostępności danych. Przedstawione tutaj wielkości należy traktować jako wartości wskaźnikowe, służące ocenie względnej kosztowności analizowanych rozwiązań, a nie jako pełne koszty inwestycyjne realizacji robót w terenie.

W analizie rozwiązań projektowych dotyczących transportu ścieków istotnym elementem wpływającym na koszty inwestycyjne i eksploatacyjne systemu kanalizacyjnego jest materiał, z którego wykonuje się przewody. Rozpatrzono trzy podstawowe warianty materiałowe stosowane w systemach kanalizacji grawitacyjnej i tłocznej: polietylen, polichlorek winylu oraz rury betonowe.

Aby umożliwić porównanie analizowanych wariantów materiałowych zestawiono ich podstawowe właściwości w aspekcie technicznym i ekonomicznym (tabela 2). Koszty określono na podstawie danych katalogowych producentów oraz analiz rynkowych.

Tabela 2. Porównanie właściwości materiałów przewodów kanalizacyjnych (opracowanie własne na podstawie [22, 21, 45])

Table 2. Comparison of the properties of sewer pipe materials (author's own analysis based on [22, 21, 45])

Cecha	PE	PVC	Beton
Odporność chemiczna	bardzo wysoka	wysoka	średnia
Wytrzymałość mechaniczna	wysoka	średnia	bardzo wysoka
Elastyczność	bardzo wysoka	niska	bardzo niska
Chropowatość hydrauliczna	bardzo niska	niska	wysoka
Łatwość montażu	średnia	wysoka	niska
Koszt materiału	ok. 200–400 zł/mb	ok. 50–200 zł/mb	ok. 150–350 zł/mb
Trwałość eksploatacyjna	bardzo wysoka	wysoka	bardzo wysoka
Zastosowanie	systemy tłoczne i grawitacyjne	głównie systemy grawitacyjne	duże średnice kanałów, kolektory

3.2. Uproszczona analiza zapotrzebowania na energię elektryczną

Elementem analizy kosztów eksploatacyjnych jest określenie zapotrzebowania na energię elektryczną obiektów infrastruktury. W analizowanym przypadku są to przepompownie ścieków, które stanowią kluczowe obiekty technologiczne w systemach transportu ścieków na większe odległości. Dla każdego wariantu obliczenia wykonano według jednakowego schematu, przyjmując następujące założenia:

- prędkość przepływu ścieków w rurociągu tłocznym wynosi 1,0 m/s,
- długość rurociągu tłoczego odpowiada odległości od ściany zewnętrznej zbiornika pompowni do ściany zewnętrznej studni rozprężnej i jest ograniczona do wartości wymaganej dla podniesienia ścieków do studni rozprężnej kolejnego systemu grawitacyjnego,
- teren wznosi się jednostajnie w kierunku studni rozprężnej; wysokość geometryczna odpowiada różnicy rzędnych pomiędzy zwierciadłem ścieków w pompowni a wlotem przewodu tłoczego do studni rozprężnej,
- zwierciadło ścieków w pompowni nie uwzględnia minimalnego poziomu roboczego, wynikającego z wysokości czynnej,
- rurociąg tłoczny prowadzony jest równoległe do powierzchni terenu,
- przepompownie ścieków i studnie rozprężne mają charakter obiektów modelowych, więc informacje o przyjętych wymiarach zbiornika i zmianach poziomu zwierciadła ścieków nie stanowią przedmiotu niniejszego etapu projektowego.

Procedura obliczenia zapotrzebowania na energię składa się z następujących etapów:

1. Przyjęcie przepływu obliczeniowego równego co do wartości dopływowi ścieków do pompowni.
2. Dobranie średnicy rurociągu tłoczego przy założonej prędkości przepływu ścieków.
3. Wyznaczenie jednostkowych strat energii w przewodzie tłocznym na podstawie danych katalogowych producenta rur (nomogramy hydrauliczne dla rur polietylenowych).
4. Obliczenie liniowych strat energii w rurociągu tłocznym zgodnie ze wzorem (1):

$$\Delta h = i \cdot L \quad (1)$$

gdzie:

Δh – liniowa strata energii w rurociągu tłocznym, m

i – jednostkowa strata energii z nomogramu producenta rur, m/m

L – przyjęta długość rurociągu tłoczego, m

5. Określenie geometrycznej różnicy wysokości dla danego układu pompownia – studnia rozprężna.

6. Wyznaczenie całkowitej wysokości podnoszenia ze wzoru (2):

$$H = H_g + \Delta h \quad (2)$$

gdzie:

H – całkowita wysokości podnoszenia, m

H_g – geometryczna różnica wysokości, m

Δh – liniowa strata energii w rurociągu tłocznym, m

7. Obliczenie mocy użytecznej zgodnie ze wzorem (3):

$$P = \rho \cdot g \cdot Q \cdot H \quad (3)$$

gdzie:

P – mocy użyteczna pomp tłocznych, W

ρ – gęstość ścieków, kg/m³

g – przyspieszenie ziemskie, m/s²

Q – przepływ obliczeniowy, m³/s

H – całkowita wysokość podnoszenia, m

8. Określenie kosztów energii.

W celu określenia kosztów należy przyjąć tryb pracy systemu w skali roku. Umożliwi to przeliczenie zapotrzebowania mocy na roczne zużycie energii elektrycznej. W niniejszym przypadku założono czas pracy wynoszący 8760 godzin, równy całodobowej pracy systemu przez 365 dni w roku. Na tej podstawie wyznaczono roczne zużycie energii ze wzoru (4):

$$E_{rok} = P \cdot 8760 \tag{4}$$

gdzie:

E_{rok} – roczne zużycie energii elektrycznej, kWh

P – moc użyteczna pompowni, kW

W kolejnym kroku należy przyjąć jednostkową cenę energii elektrycznej (w analizowanym przypadku 0,95 zł/kWh). Przyjęta wartość odpowiada uśrednionym kosztom energii czynnej wraz z opłatami dystrybucyjnymi dla odbiorców instytucjonalnych i infrastruktury komunalnej. Wartość ta została określona na podstawie danych publikowanych przez Urząd Regulacji Energetyki, w szczególności średniej rocznej ceny sprzedaży energii elektrycznej na rynku konkurencyjnym, która w 2025 roku wyniosła 458,24 zł/MWh. Odzwierciedla ona wyłącznie koszt energii czynnej wynikający z obrotu hurtowego na rynku energii i nie uwzględnia kosztów dystrybucji, podatków oraz pozostałych opłat taryfowych ponoszonych przez odbiorców końcowych. W analizach dotyczących infrastruktury komunalnej stosuje się wartości skorygowane, obejmujące pełny koszt dostarczenia energii elektrycznej, który w zależności od grupy taryfowej oraz warunków umowy może wynosić około 0,85–1,05 zł/kWh. Na tej podstawie wyznaczono roczny koszt energii ze wzoru (5):

$$K_{rok} = E_{rok} \cdot 0,95 \tag{5}$$

gdzie:

K_{rok} – roczne koszty energii elektrycznej, zł/rok

E_{rok} – roczne zużycie energii elektrycznej, kWh

Końcowym krokiem obliczeń jest odniesienie kosztu rocznego do standardowego czasu użytkowania infrastruktury. W niniej-

szym przypadku okres analizy ekonomicznej przyjęto na poziomie 30 lat, co odpowiada standardowemu przewidywanemu okresowi użytkowania infrastruktury kanalizacyjnej. Całkowity koszt energii w przyjętym horyzoncie czasowym wyznaczono ze wzoru (6):

$$K_{30} = K_{rok} \cdot 30 \tag{6}$$

gdzie:

K_{30} – 30-letni koszt całkowity energii elektrycznej, zł

K_{rok} – roczny koszt energii elektrycznej, zł/rok

4. Charakterystyka przedmiotu badań

Cieśle Małe to jednostka osadnicza o rozproszonej zabudowie i istniejących funkcjach rolniczych. Teren gminy zasadniczo pokrywa glina zwałowa zalegające pod stosunkowo cienką warstwą piasków sandrowych o zróżnicowanej granulacji. Występowanie gruntów spoistych oraz lokalnie podwyższonych poziomów wód gruntowych wpływa na sposób posadowienia przewodów kanalizacyjnych oraz warunki wykonawcze związane z realizacją robót ziemnych.

Projektowany system kanalizacyjny stanowi rozwinięcie koncepcji opracowanej w ramach pracy [29] i został przyjęty jako punkt wyjściowy do dalszych analiz porównawczych dotyczących sposobów transportu ścieków na większe odległości. Założenia projektowe oparto na charakterystyce jednostki osadniczej, analizie lokalnych uwarunkowań terenowych oraz możliwościach technicznych odprowadzania ścieków do istniejących sieci kanalizacyjnych i oczyszczalni ścieków znajdujących się poza obszarem miejscowości.

Przewidziano wykorzystanie systemu kanalizacji grawitacyjnej rozdzielczej, uzupełnionej o systemy ciśnieniowe. Przyjęto cztery warianty odprowadzania ścieków:

Wariant I: do oczyszczalni ścieków w Kołaczkwie,

Wariant II: do oczyszczalni ścieków w Tarnowej,

Wariant III: do istniejącego systemu kanalizacji sanitarnej w Pyzdrach,

Wariant IV: do istniejącego systemu kanalizacji sanitarnej w Tarnowej.

W tabeli 3 zestawiono parametry techniczne analizowanych wariantów transportu ścieków z miejscowości Cieśle Małe do potencjalnych punktów odbioru. Zestawienie umożliwia bezpośrednie porównanie poszczególnych rozwiązań pod względem długości tras, warunków wysokościowych, liczby urządzeń wspomagających oraz podstawowych cech technicznych projektowanej sieci kanalizacyjnej.

Tabela 3. Zestawienie parametrów projektowanych wariantów transportu ścieków. Źródło: opracowanie własne
Table 3. Summary of parameters for the proposed sewage transportation options. Source: authors' own study

Parametr	Wariant I	Wariant II	Wariant III	Wariant IV
Odbiornik ścieków	Oczyszczalnia ścieków w Kołaczkwie	Oczyszczalnia ścieków w Tarnowej	System kanalizacji w Pyzdrach	System kanalizacji w Tarnowej
Długość sieci	4,20 km	4,30 km	1,05 km	5,65 km
Średnica kanałów grawitacyjnych	200 mm	200 mm	200 mm	200 mm
Liczba przepompowni ścieków	9	8	2	9
Maksymalne zagłębienie kanałów	4,35 m	4,42 m	4,11 m	4,81 m
Minimalne zagłębienie kanałów	1,40 m	1,40 m	1,40 m	1,40 m
Liczba studzienek rewizyjnych	85	87	22	114
Spadek kanałów grawitacyjnych	5‰	5–15‰	5‰	5‰
Charakter terenu	równinny	równinny	równinny	równinny
Główne utrudnienia	duża liczba obiektów punktowych i eksploatacyjnych	konieczność zmiany spadków w strefach lokalnych obniżen	ograniczona redundancja układu oraz wrażliwość na awarie punktowe	znaczna długość trasy, zwiększone straty hydrauliczne i energetyczne

Tabela 4. Macierz SWOT wariantów transportu ścieków. Źródło: opracowanie własne
Table 4. SWOT matrix of sewage transportation options. Source: authors' own study

	Mocne strony (S)	Słabe strony (W)	Szanse (O)	Zagrożenia (T)
Wariant I transport ścieków do oczyszczalni ścieków w Kołaczkanie	Możliwość podłączenia do zmodernizowanej oczyszczalni. Centralizacja gospodarki ściekowej na terenie gminy. Możliwość dalszej rozbudowy systemu i podłączenia kolejnych miejscowości. Przebieg trasy wzdłuż istniejących dróg lokalnych. Stosunkowo korzystne warunki terenowe. Ograniczenie kolizji z istniejącą infrastrukturą.	Długość sieci przesyłowej, liczba przepompowni. Podwyższone koszty OPEX związane ze zużyciem energii. Większa awaryjność wynikająca z liczby obiektów technologicznych. Wyższe koszty robót ziemnych.	Możliwość pozyskania środków zewnętrznych na rozwój infrastruktury. Możliwość etapowej rozbudowy systemu centralizującego. Poprawa gospodarki ściekowej na obszarach wiejskich. Możliwość dalszej rozbudowy systemu i podłączenia kolejnych jednostek osadniczych (Wszembórz) do centralnego systemu oczyszczania ścieków.	Ryzyko wzrostu kosztów CAPEX spowodowane długością sieci. Możliwość występowania utrudnionych warunków gruntowo-wodnych. Wysokie koszty utrzymania infrastruktury w długim okresie eksploatacji. Ryzyko awarii przepompowni. Długość przewodów, generująca wyższe koszty budowy.
Wariant II transport ścieków do oczyszczalni ścieków w Tarnowej	Możliwość wykorzystania rozbudowywanej oczyszczalni. Prowadzenie przewodów głównie w drogach zwirowych ograniczających koszty odtworzenia nawierzchni. Ograniczenie kolizji z istniejącą infrastrukturą. Możliwość dalszej rozbudowy systemu.	Długość sieci przesyłowej, liczba przepompowni. Podwyższone koszty OPEX związane ze zużyciem energii. Większa awaryjność wynikająca z liczby obiektów technologicznych. Konieczność prowadzenia robót na terenach użytkowanych rolniczo. Lokalne obniżenia terenu wymagające większych spadków kanałów. Wyższe koszty robót ziemnych.	Możliwość pozyskania środków zewnętrznych na rozwój infrastruktury. Możliwość wykorzystania zwiększonej przepustowości oczyszczalni po modernizacji. Poprawa gospodarki ściekowej na obszarach wiejskich. Możliwość dalszego rozwoju infrastruktury.	Ryzyko wzrostu kosztów CAPEX spowodowane długością sieci. Możliwość występowania utrudnionych warunków wodnych. Ryzyko uszkodzeń infrastruktury podczas prac rolniczych. Konieczność przekroczenia dróg dojazdowych oraz skrzyżowania z infrastrukturą drogową. Długość przewodów, generująca wyższe koszty budowy.
Wariant III transport ścieków do istniejącego systemu kanalizacji sanitarnej w Pyzdrach	Możliwość wykorzystania istniejącej infrastruktury, najkrótsza długość projektowanej sieci. Najniższe koszty CAPEX spośród analizowanych wariantów, niewielka liczba przepompowni ścieków. Najmniejsze koszty OPEX, Przebieg trasy wzdłuż istniejącej drogi lokalnej. Ograniczony zakres robót ziemnych i mniejsze oddziaływanie przedsięwzięcia na środowisko.	Uzależnienie funkcjonowania systemu od istniejącej infrastruktury w Pyzdrach. Ryzyko ograniczonej przepustowości istniejącej sieci kanalizacyjnej.	Możliwość pozyskania środków zewnętrznych na rozwój infrastruktury. Możliwość szybkiej realizacji inwestycji. Możliwość modernizacji istniejącej infrastruktury w przyszłości.	Ryzyko przeciążenia istniejącego systemu kanalizacyjnego. Konieczność uzyskania zgody zarządcy istniejącej sieci. Możliwość wystąpienia dodatkowych kosztów modernizacji infrastruktury odbiorczej.
Wariant IV transport ścieków do istniejącego systemu kanalizacji sanitarnej w Tarnowej	Możliwość wykorzystania istniejącej infrastruktury. Możliwość dalszej rozbudowy systemu i podłączenia kolejnych miejscowości. Przebieg trasy wzdłuż istniejących dróg lokalnych.	Najdłuższa trasa przesyłowa spośród analizowanych wariantów. Duża liczba przepompowni ścieków. Najwyższe koszty OPEX. Zwiększona energochłonność systemu. Wysokie koszty CAPEX, dłuższy czas realizacji inwestycji ze względu na jej skomplikowanie.	Możliwość pozyskania środków zewnętrznych na rozwój infrastruktury. Możliwość dalszej rozbudowy systemu i podłączenia kolejnych jednostek osadniczych (Splawie) do centralnego systemu oczyszczania ścieków. Poprawa uporządkowania gospodarki ściekowej na większym obszarze.	Wysokie ryzyko awaryjności wynikające z długości systemu i liczby przepompowni. Ryzyko wzrostu kosztów CAPEX spowodowane długością sieci. Ryzyko wzrostu kosztów energii i utrzymania infrastruktury. Możliwość wystąpienia trudnych warunków gruntowo-wodnych. Możliwość wystąpienia dodatkowych kosztów modernizacji infrastruktury odbiorczej.

5. Wyniki analiz
5.1. Ocena jakościowa (SWOT)

W celu przeprowadzenia jakościowej oceny projektowanych wariantów transportu ścieków zastosowano analizę SWOT. W tabeli 4 przedstawiono zestawienie wyników SWOT dla wszystkich wariantów transportu ścieków.

5.2. Ocena ilościowa (wyniki analizy kosztów materiałowych i robót ziemnych)

Wyniki uproszczonej analizy kosztów materiałowych i robót ziemnych zestawiono w tabeli 5. Współczynnik korekcyjny uwzględnia wpływ rodzaju gruntu, głębokości wykopu, średnicy rur oraz warunków lokalizacyjnych prowadzenia robót.

W ramach analizy kosztów materiałowych przewodów kanalizacyjnych przeprowadzono porównanie dwóch wariantów: PVC oraz rur betonowych o średnicy nominalnej DN 200. Analiza została wykonana w oparciu o jednakowe założenia geometryczne dla wszystkich wariantów sieci. Na podstawie długości sieci obliczono całkowite koszty przewodów kanalizacyjnych w zależności od zastosowanego materiału (tabela 6).

Tabela 5. Wyniki analizy kosztów wykonania wykopów.
Źródło: opracowanie własne
Table 5. Results of the analysis of excavation costs.
Source: authors' own study

Wariant	Długość [m]	Współczynnik korekcyjny	Koszt wykopu [zł]
I	4 200	2,2	300 300
II	4 300	1,2	167 700
III	1 050	2,2	75 075
IV	5 650	2,2	403 975

Tabela 6. Zestawienie kosztów przewodów w zależności od zastosowanego materiału. Źródło: opracowanie własne
Table 6. Summary of pipes costs by material used.
Source: authors' own study

Wariant	Długość [m]	Koszt przewodów PVC [zł]	Koszt przewodów betonowych [zł]
I	4 200	40 5426	1 050 000
II	4 300	41 5079	1 075 000
III	1 050	10 1356	262 500
IV	5 650	54 5394	1 412 500

5.3. Ocena ilościowa (wyniki analizy zapotrzebowania na energię elektryczną)

Wyniki analizy zapotrzebowania na energię pokazano zestawiając liczbę i moc użyteczną poszczególnych pompowni ścieków (P1, P2 itd.) w analizowanych wariantach (tabela 7). Z kolei w tabeli 8 wykonano porównanie zapotrzebowania na energię elektryczną oraz wynikających z niego kosztów eksploatacyjnych dla wszystkich analizowanych wariantów transportu ścieków. Najbardziej korzystny okazał się wariant III, natomiast najmniej korzystny wariant I.

Tabela 7. Liczba i moc użyteczna pompowni (wyrażona w watach) w zależności od wariantu transportu ścieków. Źródło: opracowanie własne
Table 7. Number and useful power of pumping stations (expressed in watts) depending on the wastewater transport option Source: authors' own study

Pompownia	Wariant I	Wariant II	Wariant III	Wariant IV
P1	28,4	28,9	14,2	23,0
P2	33,3	20,8	23,1	30,5
P3	30,4	30,5		28,6
P4	30,8	32,0		33,6
P5	27,9	31,8		18,4
P6	30,1	28,8		32,5
P7	27,1	25,2		19,8
P8	25,9	29,7		32,8
P9	25,1			28,0

Tabela 8. Zestawienie wartości energochłonności i kosztów eksploatacyjnych. Źródło: opracowanie własne
Table 8. Comparison of energy consumption and operating costs. Source: authors' own study

Wariant	P [W]	E _{rok} [kWh]	K _{rok} [zł]	K ₃₀ [zł]
I	259	2 269	2 155	64 659
II	228	1 994	1 895	56 842
III	38	327	310	9 307
IV	247	2 166	2 057	61 723

6. Dyskusja wyników

Przeprowadzone analizy umożliwiły ocenę czterech wariantów transportu ścieków z miejscowości Cieśle Małe. Zastosowana metoda obejmowała analizę SWOT oraz uproszczoną analizę energochłonności i kosztów. Takie podejście pozwoliło na ilościową i jakościową ocenę rozwiązań.

Uzyskane rezultaty wskazują, że o racjonalności rozwiązania systemu transportu ścieków w największym stopniu decydują długość tras przesyłowych, liczba przepompowni ścieków oraz możliwość wykorzystania istniejącej infrastruktury technicznej. Czynniki te wpływają jednocześnie na poziom nakładów inwestycyjnych, koszty eksploatacji, niezawodność funkcjonowania systemu oraz jego podatność na zakłócenia. Podobne zależności wskazywane są w literaturze dotyczącej planowania i optymalizacji systemów kanalizacyjnych, gdzie podkreśla się, że rozbudowa układów przesyłowych prowadzi do wzrostu kosztów budowy i utrzymania infrastruktury oraz zwiększa ryzyko występowania awarii [8, 13, 35]. Szczególne znaczenie przypisuje się przepompowniom ścieków, które stanowią elementy generujące dodatkowe koszty inwestycyjne i eksploatacyjne, a jednocześnie należą do najbardziej wrażliwych obiektów całego systemu [24, 36].

Najkorzystniejsze wyniki uzyskano dla wariantu III, zakładającego odprowadzenie ścieków do istniejącego systemu kanalizacji sanitarnej w Pyzdrach. Rozwiązanie to wyróżniało się najkrótszą trasą przesyłową, najmniejszą liczbą przepompowni oraz najniższymi kosztami robót ziemnych. Konsekwencją było również najniższe zużycie energii elektrycznej i najniższe koszty eksploatacyjne w całym analizowanym okresie. Otrzymane wyniki potwierdzają obserwacje przedstawiane w literaturze, zgodnie z którymi wykorzystanie istniejącej infrastruktury może prowadzić do istotnego ograniczenia nakładów inwestycyjnych przy zachowaniu wymaganej funkcjonalności systemu [28, 44].

Należy podkreślić, że przewaga wariantu III wynika przede wszystkim ze specyfiki analizowanego przypadku. Cieśle Małe charakteryzuje się stosunkowo niewielką liczbą mieszkańców oraz korzystnym położeniem względem istniejącego systemu kanalizacyjnego w Pyzdrach. W innych warunkach lokalizacyjnych, przy większych odległościach lub ograniczonej przepustowości infrastruktury odbiorczej, uzyskane rezultaty mogłyby być odmiennie. Skuteczność tego rozwiązania pozostaje bowiem uzależniona od możliwości przyjęcia dodatkowego strumienia ścieków przez istniejący system oraz od dostępnych rezerw hydraulicznych i technologicznych infrastruktury odbiorczej. Konieczność każdorazowej weryfikacji tych parametrów podkreślana jest również w opracowaniach dotyczących centralizacji gospodarki ściekowej [28].

Warianty I i II uzyskały zbliżone wyniki zarówno pod względem jakościowym, jak i ilościowym. W obu przypadkach konieczne było zaprojektowanie rozbudowanych układów przesyłowych wyposażonych w liczne przepompownie ścieków, co bezpośrednio wpłynęło na wzrost kosztów realizacji inwestycji oraz kosztów późniejszej eksploatacji. Uzyskane rezultaty potwierdzają zależność opisywaną w literaturze, zgodnie z którą wzrost długości systemu transportowego powoduje zwiększenie kosztów budowy, utrzymania oraz zużycia energii elektrycznej [5, 20, 39]. Jednocześnie oba rozwiązania posiadają istotną zaletę w postaci możliwości wykorzystania istniejących lub modernizowanych oczyszczalni ścieków. W dłuższej perspektywie może to sprzyjać rozwojowi infrastruktury kanalizacyjnej na terenach wiejskich oraz poprawie poziomu skanalizowania gminy [3, 14]. Dodatkowym atutem wariantu I jest jego potencjał rozwojowy, wynikający z możliwości przyszłego włączenia do systemu kanalizacyjnego miejscowości Wszembórz, zlokalizowanej w rejonie projektowanej trasy przesyłowej.

Najmniej korzystnie oceniono wariant IV. Decydujący wpływ na jego ocenę miała największa długość projektowanej sieci oraz konieczność zastosowania dziewięciu przepompowni ścieków. Skutkowało to najwyższymi kosztami robót ziemnych, wysokimi kosztami eksploatacyjnymi oraz zwiększoną złożonością całego układu. Uzyskane wyniki pozostają zgodne z wnioskami przedstawianymi w literaturze, zgodnie z którymi wielostopniowe systemy transportu ścieków cechują się większym poziomem ryzyka eksploatacyjnego i wyższymi wymaganiami w zakresie utrzymania infrastruktury [24, 30, 38]. Pomimo niekorzystnych wyników ekonomicznych i eksploatacyjnych wariant IV charakteryzuje się również pewnym potencjałem rozwojowym, umożliwiającym w przyszłości podłączenie do systemu kanalizacyjnego miejscowości Cieśle Wielkie oraz Spławie. Należy jednak podkreślić, że w warunkach analizowanego przypadku korzyści

związane z możliwością dalszej rozbudowy systemu nie rekompensują wysokich nakładów inwestycyjnych i eksploatacyjnych.

Szczególnie wyraźne różnice pomiędzy analizowanymi wariantami ujawniły się w zakresie zapotrzebowania na energię elektryczną. Najniższe zużycie energii oraz najniższe koszty eksploatacyjne odnotowano dla wariantu III, natomiast najwyższe dla wariantu I. Potwierdza to, że do najważniejszych czynników determinujących energochłonność systemów kanalizacyjnych należą liczba przepompowni ścieków, całkowita wysokość podnoszenia oraz ukształtowanie terenu wpływające na przebieg niwelety kanałów [9, 31].

Korzystne parametry energetyczne wariantu III wynikają nie tylko z niewielkiej długości trasy przesyłowej, lecz również z małych różnic wysokościowych występujących na analizowanym obszarze. Pozwoliło to ograniczyć liczbę urządzeń tłocznych do dwóch obiektów, a tym samym zmniejszyć całkowitą wysokość podnoszenia ścieków. Odmienna sytuacja występowała w wariantach I i II, gdzie profil terenu wykazywał stopniowe wznoszenie się w kierunku odbiornika ścieków. Konieczność pokonywania dodatkowych różnic wysokości powodowała wzrost zapotrzebowania energetycznego oraz wymagała zastosowania większej liczby przepompowni. Interesującym przypadkiem jest wariant IV, dla którego teren obniżał się w kierunku odbiornika. Taki układ wysokościowy teoretycznie sprzyjał grawitacyjnemu transportowi ścieków, jednak potencjalne korzyści hydrauliczne zostały w znacznym stopniu zniwelowane przez największą długość sieci oraz dużą liczbę przepompowni. Wyniki te wskazują, że efektywność energetyczna systemu jest rezultatem wzajemnego oddziaływania wielu czynników, a nie wyłącznie długości przewodów lub różnic wysokościowych rozpatrywanych oddzielnie.

W kontekście obserwowanego wzrostu cen energii elektrycznej oraz rosnących wymagań dotyczących efektywności energetycznej infrastruktury komunalnej znaczenie tego kryterium będzie prawdopodobnie wzrastać w przyszłości. Oznacza to, że energochłonność systemu powinna być traktowana jako jeden z kluczowych parametrów oceny rozwiązań przeznaczonych do wieloletniej eksploatacji [9, 39].

Analiza kosztów materiałowych wykazała, że najniższe nakłady inwestycyjne we wszystkich wariantach uzyskano przy zastosowaniu przewodów PVC. Wynik ten pozostaje zgodny z danymi producentów oraz informacjami prezentowanymi w literaturze branżowej [22, 45]. W warunkach analizowanego przypadku rozwiązanie to można uznać za najbardziej uzasadnione ekonomicznie, szczególnie ze względu na niewielką skalę projektowanego systemu oraz relatywnie mały przepływ ścieków. Należy jednak zaznaczyć, że dobór materiału przewodów nie powinien opierać się wyłącznie na kryterium kosztowym. Istotne znaczenie mają również trwałość eksploatacyjna, odporność na uszkodzenia mechaniczne, warunki gruntowo-wodne oraz przewidywany okres użytkowania infrastruktury.

Prezentowana metoda analiz posiada ograniczenia. Analiza kosztów robót ziemnych została wykonana bez sporządzania szczegółowych kosztorysów inwestorskich, natomiast w analizie energetycznej przyjęto stałe parametry pracy pompowni i nie uwzględniono możliwych zmian cen energii elektrycznej w przyszłości. Nie sprawdzono również innych wariantów, w których ograniczono by liczbę przepompowni przez wydłużenie odcinków tłocznych. Ograniczeniem pozostaje także jakościowy charakter analizy SWOT, której wyniki częściowo zależą od przyję-

tych założeń eksperckich. Podobne ograniczenia metod uproszczonych i wielokryterialnych wskazywane są w literaturze dotyczącej procesów decyzyjnych [17, 23, 26].

Pomimo wskazanych ograniczeń uzyskane wyniki umożliwiają stosunkowo szybkie porównanie analizowanych wariantów oraz identyfikację rozwiązania racjonalnego w warunkach badanego przypadku. Jest to szczególnie ważne na etapie rozważania koncepcji, gdy nie ma jeszcze pełnych danych projektowych. Przeprowadzone analizy potwierdziły przydatność zastosowanych metod oceny jako narzędzi wspomagających podejmowanie decyzji w procesie projektowania i planowania systemów kanalizacyjnych [4, 17, 43].

7. Wnioski

Na podstawie przeprowadzonych analiz i uzyskanych wyników sformułowano następujące wnioski:

Największy wpływ na wybór systemu transportu ścieków mają długość sieci kanalizacyjnej, liczba przepompowni oraz uwarunkowania terenowe wpływające na warunki hydrauliczne transportu (czynniki te oddziałują zarówno na poziom nakładów inwestycyjnych, jak i na przyszłe koszty eksploatacyjne systemu).

Analiza SWOT potwierdziła, że wykorzystanie istniejącej infrastruktury kanalizacyjnej może istotnie zwiększać racjonalność projektowanych rozwiązań, pod warunkiem zapewnienia odpowiedniej przepustowości systemu odbiorczego.

Zastosowanie analizy SWOT oraz analiz kosztowych umożliwiło skuteczne porównanie wariantów transportu ścieków i potwierdziło przydatność tych metod w procesie racjonalizacji decyzji projektowych dotyczących infrastruktury kanalizacyjnej.

Prezentowana w pracy metodyka – połączenie analizy SWOT oraz energochłonności i kosztów – może być zastosowana do wyboru racjonalnego rozwiązania projektowego przy przesyłach ścieków na większe odległości.

8. Literatura

- [1] Attri, S. D., Singh, S., Dhar, A., & Powar, S. (2022). Multi-attribute sustainability assessment of wastewater treatment technologies using combined fuzzy multi-criteria decision-making techniques. *Journal of Cleaner Production*, 357, 131849. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.131849>
- [2] Azhar, N. A., Radzi, N. a. M., & Ahmad, W. S. H. M. W. (2021). Multi-criteria decision making: a systematic review. *Recent Advances in Electrical & Electronic Engineering (Formerly Recent Patents on Electrical & Electronic Engineering)*, 14(8), 779–801. <https://doi.org/10.2174/2352096514666211029112443>
- [3] Błazejewski, R. (2003). *Kanalizacja wsi*. Polskie Zrzeszenie Inżynierów i Techników Sanitarnych, Oddział Wielkopolski.
- [4] Bolis, I., Morioka, S. N., & Sznclwar, L. I. (2017). Are we making decisions in a sustainable way? A comprehensive literature review about rationalities for sustainable development. *Journal of Cleaner Production*, 145, 310–322. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.01.025>
- [5] Butler, D., & Davies, J. W. (2010). *Urban drainage* (3rd ed.). Taylor & Francis
- [6] Chermack, T. J., & Kasshanna, B. K. (2007). The use and misuse of SWOT analysis and implications for HRD professionals. *Human Resource Development International*, 10(4), 383–399. <https://doi.org/10.1080/13678860701718760>
- [7] Collivignarelli, M. C., Todeschini, S., Abbà, A., Ricciardi, P., Miino, M. C., Torretta, V., Rada, E. C., Conti, F., Cillari, G., Calatroni, S., Lumia, G., & Bertanza, G. (2021). The performance evaluation of wastewater service: a protocol based on performance indicators applied to sewer systems and wastewater treatment plants.

- Environmental Technology*, 43(22), 3426–3443. <https://doi.org/10.1080/09593330.2021.1922509>
- [8] Duque, N., Duque, D., Aguilar, A., & Saldarriaga, J. (2020). Sewer network layout selection and hydraulic design using a mathematical optimization framework. *Water*, 12(12), 3337. <https://doi.org/10.3390/w12123337>
 - [9] Filipe, J., Bessa, R. J., Reis, M., Alves, R., & Póvoa, P. (2019). Data-driven predictive energy optimization in a wastewater pumping station. *Applied Energy*, 252, 113423. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.113423>
 - [10] Florio, M., Forte, S., Pancotti, C., Sirtori, E., & Vignetti, S. (2016). *Exploring cost-benefit analysis of research, development and innovation infrastructures: An evaluation framework*. arXiv. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1603.03654>
 - [11] Ganjidoost, A., Knight, M. A., Unger, A. J. A., & Haas, C. T. (2018). Benchmark Performance Indicators for utility water and wastewater pipelines infrastructure. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 144(3). [https://doi.org/10.1061/\(asce\)wr.1943-5452.0000890](https://doi.org/10.1061/(asce)wr.1943-5452.0000890)
 - [12] Gürel, E., & Tat, M. (2017). SWOT analysis: A theoretical review. *The Journal of International Social Research*, 10(51), 994–1006. <https://doi.org/10.17719/jisr.2017.1832>
 - [13] Habermehl, R., Bakhshpour, A. E., Dilly, T. C., Haghighi, A., & Dittmer, U. (2024). Automated pump placement algorithms for optimal sewer network design in areas with complex terrain. *Engineering Proceedings*, 69(1), 143. <https://doi.org/10.3390/engproc2024069143>
 - [14] Heidrich, Z. (1999). *Wodociąg i kanalizacja. Cz. 2: Kanalizacja*. Wydawnictwa Szkolne i Pedagogiczne.
 - [15] Ilyas, M., Kassa, F. M., & Darun, M. R. (2021). Life cycle cost analysis of wastewater treatment: A systematic review of literature. *Journal of Cleaner Production*, 310, 127549. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.127549>
 - [16] Jato-Espino, D., Castillo-Lopez, E., Rodriguez-Hernandez, J., & Canteras-Jordana, J. C. (2014). A review of application of multi-criteria decision making methods in construction. *Automation in Construction*, 45, 151–162. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2014.05.013>
 - [17] Kabir, G., Sadiq, R., & Tesfamariam, S. (2013). A review of multi-criteria decision-making methods for infrastructure management. *Structure and Infrastructure Engineering*, 10(9), 1176–1210. <https://doi.org/10.1080/15732479.2013.795978>
 - [18] Kambanou, M. L. (2020). Life Cycle Costing: Understanding How it is Practised and Its Relationship to Life Cycle Management—A Case Study. *Sustainability*, 12(8), 3252. <https://doi.org/10.3390/su12083252>
 - [19] Mpindou, G. O. M. K., Bueno, I. E., & Ramón, E. C. (2022). Risk analysis methods of water supply systems: comprehensive review from source to tap. *Applied Water Science*, 12(4). <https://doi.org/10.1007/s13201-022-01586-7>
 - [20] Kotowski, A. (2015). *Podstawy bezpiecznego wymiarowania odwodnień terenów: Tom I. Sieci kanalizacyjne* (2. wyd.). Wydawnictwo Seidel-Przywecki
 - [21] Malesinska, A., & Chudzicki, J. (2014). Change in Hydraulic Resistance of Water Supply Pipes Being Renovated with Polyethylene Pipes. *Ochrona Środowiska*, 36(3), 29–35.
 - [22] Makris, K. F., Langeveld, J., & Clemens, F. H. L. R. (2019). A review on the durability of PVC sewer pipes: research vs. practice. *Structure and Infrastructure Engineering*, 16(6), 880–897. <https://doi.org/10.1080/15732479.2019.1673442>
 - [23] Marttunen, M., Lienert, J., & Belton, V. (2017). Structuring problems for Multi-Criteria Decision Analysis in practice: A literature review of method combinations. *European Journal of Operational Research*, 263(1), 1–17. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2017.04.041>
 - [24] Misztal-Kruk, K. (2015). Reliability and failure rate analysis of pressure, vacuum and gravity sewer systems based on operating data. *Engineering Failure Analysis*, 61, 37–45. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2015.07.034>
 - [25] Nam, S., Nguyen, T. T., & Oh, J. (2019). Performance Indicators Framework for assessment of a Sanitary Sewer system using the Analytic Hierarchy Process (AHP). *Sustainability*, 11(10), 2746. <https://doi.org/10.3390/su11102746>
 - [26] Navarro, I. J., Penadés-Plà, V., Martínez-Muñoz, D., Rempling, R., & Yepes, V. (2020). Life cycle sustainability assessment for multi-criteria decision making in bridge design: a review. *Journal of Civil Engineering and Management*, 26(7), 690–704. <https://doi.org/10.3846/jcem.2020.13599>
 - [27] Oh, W., Cho, C., & Lee, M. (2023). Life cycle cost method for safe and effective infrastructure asset management. *Buildings*, 13(8), 1983. <https://doi.org/10.3390/buildings13081983>
 - [28] Pasciuccio, F., Pecorini, I., & Iannelli, R. (2022). Planning the centralization level in wastewater collection and treatment: A review of assessment methods. *Journal of Cleaner Production*, 375, 134092. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.134092>
 - [29] Patelska, W. (2025). *Koncepcja sieci kanalizacyjnej dla wybranej jednostki osadniczej* [Praca inżynierska]. Politechnika Poznańska.
 - [30] Pietrucha-Urbaniak, K., & Rak, J. (2025). Reliability, safety and risk modelling in water supply systems for Climate-Resilient Infrastructure. *Water*, 17(24), 3554. <https://doi.org/10.3390/w17243554>
 - [31] Piri, J., Masoudi, B., Haghighi, M. S., & Kisi, O. (2025). Deep learning approach to energy consumption modeling in wastewater pumping systems. *Scientific Reports*, 15(1), 39610. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-23158-w>
 - [32] Possan, E., Molin, D. C. C. D., & Andrade, J. J. O. (2018). A conceptual framework for service life prediction of reinforced concrete structures. *Journal of Building Pathology and Rehabilitation*, 3(1). <https://doi.org/10.1007/s41024-018-0031-7>
 - [33] Rodrigues, C., Martins, T. a. E., & Amaral, L. (2025). From Efficiency to circularity in the Wastewater sector: A review of Performance Indicators in Regulated countries. *Water*, 17(15), 2226. <https://doi.org/10.3390/w17152226>
 - [34] Prokopowicz, Z., & Jadwiszczak, P. (2026). Analiza techniczna SWOT systemu podwójnej fasady budynku. *Gaz, Woda i Technika Sanitarna*, 100(5), 38. <https://doi.org/10.65545/GWITS.2026.05.06>
 - [35] Saldarriaga, J., Herrán, J., González, M. A., Coy, Y., & Iglesias-Rey, P. L. (2024). Optimal Sewer Network Design Including Pumping Stations. *Engineering Proceedings*, 69(1), 16. <https://doi.org/10.3390/engproc2024069016>
 - [36] Sionkowski T., Halecki W., Chmielowski K. 2023. „An Evaluation of Pumping Stations for Pressure Sewers System Made from Concrete Coils, Polymer Concrete, and High-Density Polyethylene (HDPE)”. *Materials* 16 (2): 524.
 - [37] Sokolov, M. V. (2024). NPV, IRR, PI, PP, and DPP: A unified view. *Journal of Mathematical Economics*, 114, 102992. <https://doi.org/10.1016/j.jmateco.2024.102992>
 - [38] Tchórzewska-Cieślak, B., Pietrucha-Urbaniak, K., & Piegoń, I. (2023). The failure risk analysis of the water supply network. *Water*, 15(21), 3815. <https://doi.org/10.3390/w15213815>
 - [39] Turan, M. E., & Cetin, T. (2024). Analyzing the effect of sewer network size on optimization algorithms' performance in sewer system optimization. *Water*, 16(6), 859. <https://doi.org/10.3390/w16060859>
 - [40] Uddin, M. N., & Rabbi, M. S. (2025). A meta-analysis of cost-benefit analysis outcomes in infrastructure projects: Evidence from transport and utility sectors in developing economies. *Review of Applied Science and Technology*, 4(2), 59–86. <https://doi.org/10.63125/hsy92b75>
 - [41] Wang, X. P., Zhang, J., & Yang, T. (2014). Hybrid SWOT approach for strategic planning and formulation in China worldwide express mail service. *Journal of Applied Research and Technology*, 12(2), 230–238. [https://doi.org/10.1016/S1665-6423\(14\)72339-9](https://doi.org/10.1016/S1665-6423(14)72339-9)
 - [42] Wasiluk, J., & Hołota, E. (2024). Ocena efektywności ekonomicznej rozbudowy sieci kanalizacyjnej w miejscowości wiejskiej zlokalizowanej na terenie górzystym. *Gaz, Woda i Technika Sanitarna*, 98(11), 11–15. <https://doi.org/10.15199/17.2024.11.2>
 - [43] Zavadskas, E., Antucheviciene, J., Vilutiene, T., & Adeli, H. (2017). Sustainable Decision-Making in civil engineering, construction and building technology. *Sustainability*, 10(1), 14. <https://doi.org/10.3390/su10010014>
 - [44] Zeferino, J. A., Cunha, M. C., & Antunes, A. P. (2014). Planning regional wastewater systems across borders. *Water Resources and Economics*, 8, 4–15. <https://doi.org/10.1016/j.wre.2014.10.007>
 - [45] Zhuge, Y., Fan, W., Duan, W., & Liu, Y. (2021). The durability and rehabilitation technologies of concrete sewerage pipes: A state-of-the-art review. *Journal of Asian Concrete Federation*, 7(2). <https://doi.org/10.18702/acf.2021.12.7.2.1>
 - [46] Chogi. (2023). *Roboty ziemne – definicja, rodzaje, cennik i zakres pracy*. <https://chogi.pl/roboty-ziemne-definicja-rodzaje-cennik-i-zakres-pracy> (dostęp: 25.05.2026)
 - [47] Ekipa redakcyjna jakie instalacje. (2026). Ułożenie rur w wykopie: Cennik 2026. <https://jakie-instalacje.pl/ulozenie-rur-w-wykopie-cennik/> (dostęp: 25.05.2026)

Automatyczne działko wodno-pianowe w instalacjach przeciwpożarowych – badania hydrauliczne i weryfikacja działania systemu

Automatic water-foam monitor for fire protection systems: hydraulic investigations and system performance verification

Michał Zielina^{1*} , Bartosz Kopiczak² , Michał Bubka³, Anita Siwek³

¹ Wydział Inżynierii Środowiska i Energetyki, Politechnika Krakowska

² Wydział Mechaniczny, Politechnika Krakowska

³ ASPROJEKT Kraków

* Kontakt / Correspondence: michal.zielina@pk.edu.pl

Streszczenie:

W artykule przedstawiono wyniki badań automatycznego działka wodno-pianowego przeznaczonego do zastosowań w instalacjach przeciwpożarowych obiektów przemysłowych i magazynowych. Badane urządzenie stanowi element opracowanego przez autorów systemu gaśniczego integrującego działko wodno-pianowe, układ automatycznego sterowania oraz system detekcji termowizyjnej. Szczególną uwagę poświęcono analizie charakterystyki hydraulicznej urządzenia oraz ocenie jego działania w warunkach rzeczywistych. Zakres badań obejmował pomiary hydrauliczne, badania poligonowe oraz analizy numeryczne CFD. Wyznaczono zależności pomiędzy parametrami pracy działka a zasięgiem strumienia środka gaśniczego, określono charakterystykę strat ciśnienia oraz zweryfikowano warunki przepływu wewnątrz układu hydraulicznego. Wyniki analiz numerycznych potwierdziły brak zjawiska kawitacji w analizowanym zakresie parametrów pracy. Przeprowadzone badania wykazały możliwość uzyskania zasięgu strumienia dochodzącego do około 100 m przy ciśnieniu roboczym 12 bar i wydajności około 3700 l/min. Największy zasięg uzyskiwano dla kąta nachylenia działka wynoszącego około 30°. Badania na stanowisku ogniowym potwierdziły skuteczność działania systemu automatycznej detekcji i naprowadzania strumienia środka gaśniczego. Uzyskane wyniki wskazują, że opracowane rozwiązanie może stanowić skuteczne uzupełnienie klasycznych stałych urządzeń gaśniczych w obiektach wielkopowierzchniowych, wymagających dużego zasięgu działania oraz szybkiej reakcji na rozwijające się zagrożenia pożarowe.

Słowa kluczowe: działko wodno-pianowe, instalacje przeciwpożarowe, charakterystyka hydrauliczna, termowizja, CFD, automatyczne systemy gaśnicze

Abstract:

This paper presents the results of research and development work on an automatic water-foam monitor designed for fire protection systems used in industrial and warehouse facilities. The investigated device is a component of an innovative firefighting system developed by the authors, integrating an automatic water-foam monitor, a dedicated control system, and a thermal imaging-based fire detection system. Attention was paid to the hydraulic characteristics of the device and its integration with existing water supply systems. The research program included hydraulic measurements, numerical CFD analyses, and full-scale experimental tests carried out under laboratory and field conditions. Relationships between operating parameters and the range of the extinguishing stream were determined, pressure loss characteristics were established, and flow conditions inside the hydraulic system were evaluated. The CFD analyses confirmed the absence of cavitation within the investigated operating range and allowed verification of the experimentally obtained results. The results showed that the monitor could achieve an extinguishing stream range of approximately 100 m at an operating pressure of 12 bar and a flow rate of about 3700 L/min. The maximum range was obtained for a monitor elevation angle of approximately 30°. Full-scale fire tests confirmed the effectiveness of the automatic fire detection and stream positioning functions developed by the authors. The obtained results indicate that the proposed solution can be used as an effective supplement or alternative to conventional fixed firefighting systems in large industrial facilities requiring long-range operation and rapid response to developing fire hazards.

Keywords: water-foam monitor, fire protection systems, hydraulic characteristics, thermal imaging, CFD, automatic firefighting systems, fire detection, industrial facilities

1. Wprowadzenie

Systemy ochrony przeciwpożarowej oparte na instalacjach wodnych stanowią podstawowy element zabezpieczenia współczesnych obiektów przemysłowych i magazynowych. Najczęściej stosowane rozwiązania obejmują instalacje tryskaczowe projektowane zgodnie z normami NFPA 13 oraz EN 12845, które określają wymagania dotyczące projektowania, instalacji i eksploatacji systemów gaśniczych [3, 8]. Systemy te cechują się wysoką skutecznością w ograniczaniu rozwoju pożaru, jednak ich efektywność zależy od warunków instalacyjnych, właściwego rozmieszczenia urządzeń oraz charakterystyki chronionego obiektu.

W literaturze wskazuje się, że w przypadku obiektów o dużej kubaturze, takich jak hale przemysłowe i magazyny wysokiego składowania, klasyczne systemy stałe mogą wykazywać ograniczoną skuteczność wynikającą z opóźnionej detekcji pożaru oraz utrudnionej dystrybucji środka gaśniczego [1, 6, 7]. Problemy te wynikają m.in. z oddziaływania strumienia konwekcyjnych gorących gazów, ograniczonej penetracji strumienia wodnego oraz nierównomiernego rozkładu kropli w przestrzeni.

Jednym z kierunków rozwoju systemów gaśniczych są rozwiązania wykorzystujące rozpylone strumienie wody oraz mgłę wodną (water mist). Badania wykazały, że skuteczność gaszenia zależy od parametrów fizycznych strumienia, takich jak średnica kropli, intensywność przepływu oraz charakterystyka oddziaływania z płomieniem [6]. Systemy mgły wodnej umożliwiają efektywne chłodzenie strefy spalania i ograniczenie promieniowania ciepłego przy jednoczesnym zmniejszeniu zużycia wody [5, 11]. Współcześnie technologia ta znajduje szerokie zastosowanie w instalacjach przemysłowych i specjalnych systemach gaśniczych.

Alternatywnym podejściem są systemy wykorzystujące działka wodne i wodnopianowe, które umożliwiają kierunkowe podawanie dużych ilości środka gaśniczego na znaczne odległości. Rozwiązania te są szczególnie przydatne w obiektach o dużej kubaturze oraz w przestrzeniach otwartych, gdzie wymagane jest szybkie i selektywne oddziaływanie na ognisko pożaru [2, 13]. Badania eksperymentalne wskazują, że automatyczne działka wodne mogą charakteryzować się krótszym czasem reakcji i skuteczniejszym tłumieniem pożaru w porównaniu do klasycznych systemów tryskaczowych w określonych warunkach [13].

Istotnym zagadnieniem związanym z eksploatacją tego typu urządzeń jest charakterystyka hydrauliczna strumienia oraz jego trajektoria. Badania wykazały, że zasięg i skuteczność działania zależą od takich parametrów jak ciśnienie robocze, kąt nachylenia, prędkość początkowa strumienia oraz warunki środowiskowe, w tym wpływ wiatru [4, 9]. W analizie tych zjawisk coraz częściej wykorzystywane są metody numeryczne (CFD), umożliwiające modelowanie przepływu oraz optymalizację parametrów pracy systemów gaśniczych [14].

Istotnym kierunkiem rozwoju współczesnych systemów przeciwpożarowych jest integracja urządzeń gaśniczych z nowoczesnymi metodami detekcji. W szczególności zastosowanie technik termowizyjnych umożliwia szybkie wykrycie źródła pożaru i jego lokalizację w czasie rzeczywistym [12]. Rozwiązania te znajdują zastosowanie w systemach automatycznych oraz au-

tonomicznych, w których detekcja i gaszenie pożaru odbywa się bez udziału operatora, co znacząco skraca czas reakcji i zwiększa skuteczność działania [10].

Pomimo rosnącej liczby badań dotyczących systemów wykorzystujących mgłę wodną oraz działka przeciwpożarowe, stosunkowo niewiele publikacji poświęconych jest kompleksowej analizie zintegrowanych systemów automatycznych działek wodnopianowych, w szczególności w kontekście ich charakterystyki hydraulicznej oraz współpracy z instalacjami zasilającymi. Z punktu widzenia praktyki projektowej istotne jest określenie zależności pomiędzy parametrami instalacji wodnej a efektywnością działania urządzenia.

Celem pracy było określenie charakterystyki hydraulicznej automatycznego działka wodno-pianowego oraz ocena jego skuteczności działania w warunkach laboratoryjnych i rzeczywistych. W ramach badań analizowano wpływ parametrów zasilania na zasięg strumienia środka gaśniczego, a także oceniono działanie opracowanego przez autorów systemu automatycznego naprowadzania działka wykorzystującego detekcję termowizyjną.

Badania przeprowadzono na dwóch niezależnych poligonach badawczych. Pierwszy z nich przeznaczony był do badań hydraulicznych i wyznaczenia charakterystyki strumienia środka gaśniczego. Drugi poligon wykorzystano do badań działania kompletnego systemu gaśniczego obejmującego działko wodno-pianowe, system detekcji termowizyjnej oraz układ automatycznego sterowania.

2. Materiały i metody

2.1. Charakterystyka badanego urządzenia

Przedmiotem badań było automatyczne działko wodno-pianowe przeznaczone do zastosowań w instalacjach przeciwpożarowych obiektów przemysłowych i magazynowych. Urządzenie umożliwia kierunkowe podawanie strumienia środka gaśniczego na znaczne odległości oraz pracę w trybie ręcznym, półautomatycznym i automatycznym. Na rys. 1 przedstawiono badane działko wodnopianowe w pomieszczeniu zamkniętym i na stanowisku poligonowym.



Rys. 1. Badane działko wodno-pianowe w pomieszczeniu zamkniętym (po lewej) oraz na stanowisku poligonowym (po prawej)
Źródło: opracowanie własne

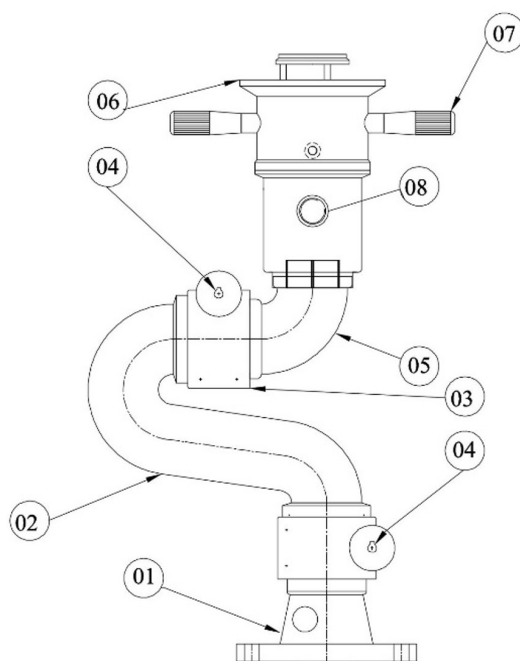
Fig. 1. Tested water-foam monitor in an indoor facility (left) and at the outdoor test range (right). Source: authors' own study

Istotnym elementem opracowanego rozwiązania jest możliwość współpracy z systemem detekcji opartym na analizie obrazu termicznego. Opracowany system umożliwiał identyfikację źródła podwyższonej temperatury przy pomocy zestawu kamer termowizyjnych Optris Xi 410, a następnie generował sygnały sterujące dla układu napędowego działka, co pozwalało na automatyczne naprowadzanie strumienia środka gaśniczego na obszar zagrożenia.

Działko składało się z podstawowych zespołów funkcjonalnych, do których należały:

- układ hydrauliczny obejmujący korpus, przewody doprowadzające oraz głowicę zakończoną dyszą,
- układ mechaniczny odpowiedzialny za zmianę położenia strumienicy w płaszczyźnie poziomej i pionowej,
- układ napędowy realizowany za pomocą siłowników elektrycznych,
- układ sterowania umożliwiający realizację procesu naprowadzania strumienia.

Układ hydrauliczny zaprojektowano w sposób zapewniający minimalizację strat ciśnienia przy jednoczesnym zachowaniu odpowiedniej charakterystyki strumienia. Kluczowym elementem jest dysza, której geometria wpływa na kształt strugi, stopień rozdrobnienia kropli oraz efektywność transportu środka gaśniczego. Schemat konstrukcyjny urządzenia przedstawiono na rys. 2.



Rys. 2. Schemat konstrukcyjny działka wodnopianowego (1 – kołnierz z redukcją symetryczną, 2 – kolano długie, 3 – wewnętrzne łożyska, 4 – trzpień do podłączenia sterowania, 5 – kolano 90°, 6 – dysza, 7 – uchwyt do dyszy, 8 – wejście do węża na pianę). Źródło: opracowanie własne

Fig. 2. Structural layout of the water-foam monitor (1 – flange with concentric reducer, 2 – long-radius elbow, 3 – internal bearings, 4 – control linkage shaft, 5 – 90° elbow, 6 – nozzle, 7 – nozzle mounting bracket, 8 – foam hose connection). Source: authors' own study

Podstawowe parametry techniczne badanego urządzenia obejmowały: zakres ciśnienia roboczego od około 8 do 12 bar, maksymalną wydajność dochodzącą do około 3700 l/min, maksymalny zasięg strumienia wynoszący około 100 m, zakres ruchu w płaszczyźnie poziomej rzędu 140°, zakres ruchu w płaszczyźnie pionowej od około -40° do +60°.

Parametry te odpowiadają wymaganiom stawianym urządzeniom stosowanym w ochronie obiektów wielkokubaturowych, w których istotne znaczenie ma duży zasięg działania oraz wysoka intensywność podawania środka gaśniczego. W konstrukcji działka zastosowano rozwiązania umożliwiające jego integrację z instalacją wodociagową przeciwpożarową. Urządzenie może być zasilane z różnych źródeł, takich jak sieć hydrantowa, pompownie przeciwpożarowe oraz zbiorniki retencyjne wyposażone w układy pompowe.

2.2. Metodyka badań hydraulicznych

Badania hydrauliczne przeprowadzono na stanowisku umożliwiającym regulację parametrów zasilania oraz pomiar zasięgu strumienia środka gaśniczego. Stanowisko obejmowało działko wodno-pianowe, przenośny agregat pompowy Rosenbauer SPA100, samochód pożarniczy 515[K]25 wyposażony w system sterowania Logic Control System (LCS) oraz wbudowany przepływomierz elektromagnetyczny o niepewności pomiaru $\pm 1\%$, układ przewodów zasilających, przepływomierz kryzowy FO Turbo-Lux 3 oraz zamontowany przed działkiem manometr wypełniony gliceryną o zakresie 0–15 bar i klasie dokładności 2,5, co odpowiada niepewności pomiaru wynoszącej $\pm 37,5$ kPa. Samochód pożarniczy 515[K]25 pokazano na rys. 3.



Rys. 3. Wykorzystany podczas badań samochód pożarniczy 515[K]25. Źródło: opracowanie własne

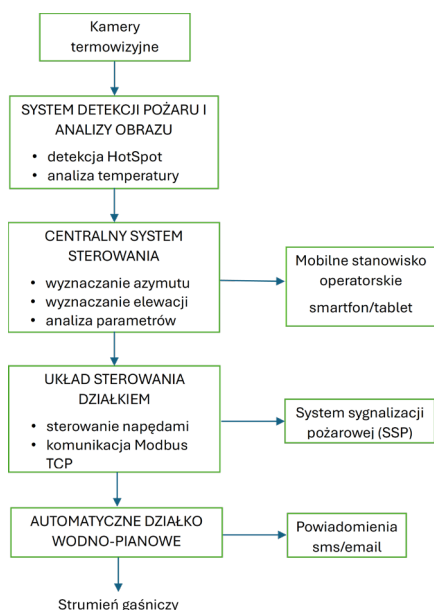
Fig. 3. Firefighting vehicle Rosenbauer 515[K]25 used in the experimental investigation. Source: authors' own study

Badane działko zamocowano do wózka widłowego, co umożliwiło stabilizację urządzenia i zmianę jego wysokości względem terenu. Woda transportowana była do działka za pomocą przewodów pożarniczych poprzez układ pomiarowy umożliwiający kontrolę parametrów pracy. Pole pomiarowe miało długość około 120 m i zostało podzielone na sektory pomiarowe rozmieszczone co 5 m. Pomiary wykonano dla różnych wartości ciśnienia roboczego, natężenia przepływu oraz kąta nachylenia strumienicy. W trakcie badań zmieniano: ciśnienie robocze, natężenie przepływu, kąt nachylenia strumienicy. Dla każdej konfiguracji parametrów określano zasięg strumienia oraz położenie jego centralnej części względem wyznaczonego pola pomiarowego.

2.3. Metodyka badań na stanowisku ogniowym

Badania na stanowisku ogniowym przeprowadzono w celu oceny funkcjonowania opracowanego przez autorów systemu gaśniczego obejmującego działko wodnopianowe, układ automatycznego sterowania oraz system detekcji termowizyjnej. Celem badań była ocena skuteczności wykrywania zagrożenia, czasu reakcji systemu, dokładności naprowadzania strumienia środka gaśniczego oraz skuteczności procesu gaszenia. Stanowisko badawcze składało się z działka wodnopianowego, układu zasilania wodą, zespołu sterowania, kamer termowizyjnych oraz stanowiska ogniowego stanowiącego źródło kontrolowanego pożaru.

W badaniach wykorzystano kamerę termowizyjną Optris Xi410 wyposażoną w detekcję najcieplejszego punktu obserwowanego obszaru. Kamera pracowała w zakresie pomiarowym od -20°C do 900°C i rejestrowała obraz termiczny o rozdzielczości 384×240 pikseli. Komunikacja z systemem sterowania realizowana była za pośrednictwem sieci Ethernet. Obraz termiczny poddawano analizie w czasie rzeczywistym w celu identyfikacji źródła ciepła oraz określenia jego położenia względem działka. Strukturę systemu detekcji zastosowaną w opracowanym prototypie przedstawiono na rys. 4.



Rys. 4. Struktura opracowanego systemu automatycznego gaszenia pożaru. Źródło: opracowanie własne

Fig. 4. Architecture of the developed automatic fire suppression system. Source: authors' own study

Sterowanie działkiem realizowano za pomocą opracowanego przez autorów systemu automatyki wykorzystującego napędy elektryczne oraz enkodery położenia. Układ sterowania wyznaczał wymagany azymut oraz kąt elewacji strumienicy na podstawie współrzędnych źródła ciepła określonych przez system termowizyjny. Komunikacja pomiędzy urządzeniami realizowana była w oparciu o przemysłowy protokół Modbus TCP. Badania prowadzono w trybie półautomatycznym oraz automatycznym. W trybie półautomatycznym operator zatwierdzał rozpoczęcie procesu gaszenia po wykryciu zagrożenia. W trybie automatycznym po przekroczeniu zadanej temperatury progowej następowało automatyczne ustawienie działka i uruchomienie podawania środka gaśniczego. W trakcie prób rejestrowano: czas reakcji systemu od momentu wykrycia źródła ciepła; czas ustawienia działka w zadanej pozycji; dokładność naprowadzania strumienia względem stanowiska ogniowego oraz czas prowadzenia procesu gaszenia. Przyjęta metodyka umożliwiła ocenę współpracy systemu detekcji termowizyjnej, układu sterowania oraz działka wodnopianowego w warunkach zbliżonych do rzeczywistych warunków eksploatacji.

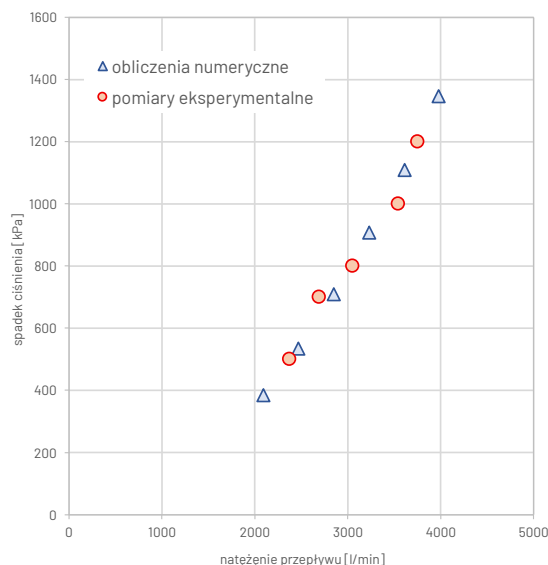
2.4. Metody analizy hydraulicznej i numerycznej

Analiza hydrauliczna obejmowała ocenę wpływu parametrów eksploatacyjnych na zasięg oraz charakterystykę strumienia środka gaśniczego. Analizowano zależności pomiędzy ciśnieniem roboczym, natężeniem przepływu i kątem nachylenia strumienicy a uzyskiwanym zasięgiem strugi. Uzupełnieniem badań eksperymentalnych była analiza numeryczna przepływu wykonana metodą CFD (Computational Fluid Dynamics). Model numeryczny odwzorowywał geometrię układu hydraulicznego działka i umożliwiał analizę rozkładu ciśnienia oraz prędkości przepływu wewnątrz urządzenia. Analizy numeryczne wykorzystano do: oceny rozkładu prędkości i ciśnienia, identyfikacji potencjalnych obszarów występowania kawitacji, określenia wpływu stopnia otwarcia układu przepływowego na parametry strumienia. Szczegółowy opis modelu numerycznego oraz wyniki obliczeń CFD zostaną przedstawione w odrębnym opracowaniu poświęconym analizie przepływu w układzie hydraulicznym działka wodnopianowego.

3. Wyniki i ich analiza

3.1. Straty ciśnienia w układzie hydraulicznym działka

Pierwszym etapem analizy było określenie strat ciśnienia występujących w układzie hydraulicznym badanego działka wodnopianowego. Pomiary eksperymentalne uzupełniono obliczeniami numerycznymi CFD, co umożliwiło ocenę zgodności obu metod badawczych.



Rys. 5. Zależność strat ciśnienia w działku wodno-pianowym od natężenia przepływu. Porównanie wyników eksperymentalnych i obliczeń CFD. Źródło: opracowanie własne

Fig. 5. Relationship between pressure loss and flow rate in the water-foam monitor. Comparison of experimental measurements and CFD results. Source: authors' own study

Wyniki przedstawione na rys. 5 wykazały nieliniowy wzrost strat ciśnienia wraz ze wzrostem natężenia przepływu. Dla przepływu około 2500 kg/min strata ciśnienia wynosiła około 500 kPa, natomiast dla przepływu około 3000 kg/min osiągała wartości zbliżone do 800 kPa. Przy największych analizowanych przepływach, wynoszących około 3700–4000 kg/min, straty ciśnienia przekraczały 1200 kPa.

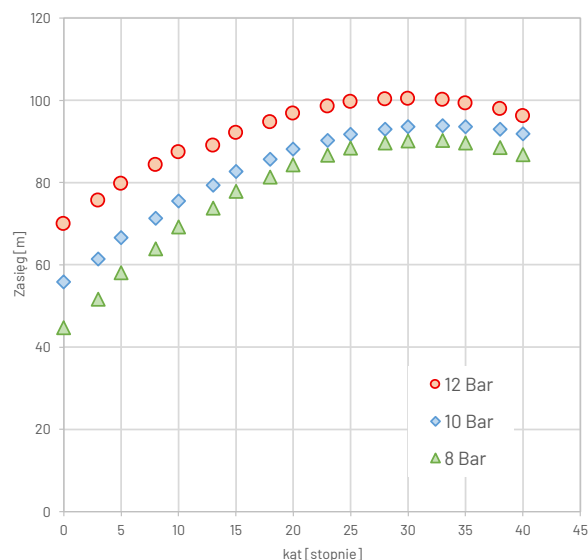
Porównanie wyników eksperymentalnych i obliczeń CFD wskazuje na bardzo dobrą zgodność obu metod. Różnice pomiędzy wartościami obliczonymi i zmierzonymi były niewielkie w całym analizowanym zakresie pracy. Potwierdza to poprawność opracowanego modelu numerycznego oraz możliwość jego wykorzystania do dalszych analiz przepływu wewnątrz badanego urządzenia.

Z praktycznego punktu widzenia uzyskana charakterystyka jest istotna podczas doboru pomp zasilających oraz projektowania instalacji współpracujących z działkiem wodno-pianowym, gdyż pozwala określić wymagane parametry hydrauliczne całego systemu. Opracowana charakterystyka została również wykorzystana w algorytmach sterowania działkiem, umożliwiając automatyczną regulację stopnia otwarcia przepustnicy w zależności od wymaganej odległości podawania środka gaśniczego i aktualnych parametrów pracy układu.

4. Charakterystyka hydrauliczna badanego działka

W wyniku przeprowadzonych badań laboratoryjnych określono zależności pomiędzy parametrami pracy działka wodno-pianowego a zasięgiem strumienia środka gaśniczego. Analizie poddano wpływ ciśnienia roboczego, natężenia przepływu oraz kąta nachylenia strumienicy. W badanym zakresie parametrów stwierdzono, że wzrost ciśnienia roboczego powoduje zwiększenie

zasięgu strumienia. Dla najwyższych wartości ciśnienia uzyskiwano największe odległości rzutu, co przekłada się bezpośrednio na zwiększenie efektywnego zasięgu działania urządzenia.



Rys. 6. Zasięg rzutu środka gaśniczego w funkcji kąta nachylenia armatki dla różnych wartości ciśnienia. Źródło: opracowanie własne

Fig. 6. Extinguishing agent stream range as a function of monitor elevation angle for different operating pressures. Source: authors' own study

Przedstawione na rys. 6 wyniki badań eksperymentalnych wykazały również istotny wpływ kąta nachylenia strumienicy na zasięg działania działka. Maksymalne wartości zasięgu uzyskiwano dla kątów z przedziału 30°–33°, natomiast dla wartości większych i mniejszych obserwowano skrócenie efektywnego zasięgu strumienia. Wzrost natężenia przepływu powodował zwiększenie zwartości strugi oraz poprawę jej stabilności, co sprzyjało osiągnięciu większych zasięgów działania działka.

4.1. Analizy numeryczne CFD (Computer Fluid Dynamic)

Uzupełnieniem badań eksperymentalnych były analizy numeryczne CFD przeprowadzone dla badanego układu hydraulicznego. Ich celem była ocena warunków przepływu oraz identyfikacja zjawisk, które nie mogą być bezpośrednio obserwowane podczas pomiarów eksperymentalnych. Przeprowadzone obliczenia umożliwiły określenie rozkładów prędkości i ciśnienia wewnątrz układu przepływowego. Szczególną uwagę zwrócono na obszary o dużych zmianach kierunku przepływu oraz lokalnych przyspieszeniach strugi. Analizy wykazały brak obszarów, w których ciśnienie spadałoby poniżej ciśnienia parowania cieczy. Oznacza to, że w analizowanym zakresie parametrów pracy nie występowały warunki sprzyjające powstawaniu kawitacji. Wynik ten potwierdza poprawność przyjętych rozwiązań konstrukcyjnych oraz możliwość bezpiecznej eksploatacji działka przy dużych wydajnościach przepływu. Dodatkowo obliczenia numeryczne umożliwiły określenie zakresu stopnia otwarcia układu przepływowego zapewniającego maksymalny zasięg strumienia. Uży-

skane wyniki pozostawały zgodne z obserwacjami wykonanymi podczas badań eksperymentalnych. Szczegółowe wyniki analiz CFD zostaną przedstawione w odrębnym opracowaniu poświęconym modelowaniu przepływu w działku wodno-pianowym.

4.2. Wyniki badań na stanowisku ogniowym

Badania prowadzone na stanowisku ogniowym miały na celu ocenę współpracy działka wodno-pianowego, systemu detekcji termowizyjnej oraz układu automatycznego sterowania. W trakcie badań system termowizyjny poprawnie identyfikował źródła ciepła znajdujące się w obszarze obserwacji. Po wykryciu zagrożenia następowało wyznaczenie współrzędnych pożaru oraz przekazanie danych do systemu sterowania działkiem.



Rys. 7. Stanowisko ogniowe wykorzystane do oceny działania automatycznego systemu gaśniczego. Źródło: opracowanie własne
Fig. 7. Fire test stand used during the evaluation of the automatic fire suppression system. Source: authors' own study

Opracowany przez autorów system automatycznie wyznaczał wymagane wartości azymutu i elewacji, a następnie ustawiał działko w kierunku źródła zagrożenia. W kolejnej fazie uruchamiane było podawanie środka gaśniczego pod odpowiednim ciśnieniem. Zarejestrowane czasy reakcji systemu mieściły się w przedziale od 1 do 2 s, natomiast czas ustawienia działka w zadanej pozycji wynosił około 9 s. Uzyskane wartości wskazują na wysoką dynamikę działania systemu. Dokładność kierowania strumienia środka gaśniczego względem celu wynosiła 0,5 m. W trakcie prób potwierdzono możliwość skutecznego podania środka gaśniczego bezpośrednio na obszar objęty pożarem. Podczas wszystkich przeprowadzonych prób potwierdzono poprawną współpracę systemu detekcji, układu sterowania oraz działka wodno-pianowego.

8.1. Ocena skuteczności opracowanego systemu

W wyniku przeprowadzonych badań określono podstawowe parametry eksploatacyjne opracowanego systemu gaśniczego. Zarejestrowane czasy reakcji systemu mieściły się w przedziale od 1 do 2 s. Czas ustawienia działka w zadanej pozycji wynosił około 9 s. Otrzymane wyniki wskazują na możliwość szybkiego reagowania na pojawiające się zagrożenia pożarowe. Dokładność naprowadzania strumienia względem stanowiska ogniowego wynosiła około 0,5 m. Uzyskana wartość okazała się wystarczająca do skutecznego skierowania środka gaśniczego na źródło pożaru. Przeprowadzone badania potwierdziły możliwość uży-

skania zasięgu strumienia rzędu 100 m, co pozwala na wykorzystanie urządzenia do ochrony obiektów wielkopowierzchniowych, takich jak hale magazynowe, place składowe oraz zakłady przemysłowe.

4.3. Dyskusja wyników

Uzyskane wyniki badań wskazują, że opracowany przez autorów system gaśniczy, integrujący działko wodno-pianowe, układ napędowy, system sterowania oraz detekcję termowizyjną, spełnia wymagania stawiane nowoczesnym instalacjom przeciwpożarowym.

Szczególnie istotne są wyniki analiz hydraulicznych, które wykazały możliwość uzyskania dużych zasięgów strumienia przy zachowaniu stabilnej pracy urządzenia. Potwierdzono również wysoką zgodność wyników eksperymentalnych oraz obliczeń CFD, co zwiększa wiarygodność opracowanego modelu numerycznego i umożliwia jego wykorzystanie do dalszych analiz przepływu w układzie hydraulicznym działka.

Analiza wyników badań hydraulicznych wykazała, że największy zasięg strumienia uzyskiwany jest dla kąta nachylenia działka wynoszącego około 30°. Wynik ten pozostaje zgodny z obserwacjami prezentowanymi w literaturze dla *działek wodno-pianowych*, dla których maksymalny zasięg strumienia osiągany jest zazwyczaj przy kątach mniejszych od 45° [4, 9].

Należy zauważyć, że w klasycznym modelu rzutu ukośnego punktu materialnego, przy pominięciu oporów ruchu, maksymalny zasięg osiągany jest dla kąta 45°. W przypadku rzeczywistej strugi wodnej warunek ten nie jest jednak spełniony. Na tor lotu strugi wpływają między innymi opory aerodynamiczne, turbulencje, rozpad strumienia na krople, geometria dyszy oraz warunki atmosferyczne. W rezultacie największy zasięg działania działka uzyskiwany jest przy kątach mniejszych od wartości teoretycznej [4, 9].

Istotnym wynikiem badań była również ocena warunków przepływu wewnątrz układu hydraulicznego. Przeprowadzone analizy CFD nie wykazały występowania obszarów, w których mogłoby dojść do inicjacji zjawiska kawitacji. Oznacza to, że konstrukcja układu hydraulicznego zapewnia odpowiednie warunki przepływu nawet przy dużych wydajnościach przekraczających 3500 kg/min.

Dodatkową korzyścią wynikającą z analiz hydraulicznych było opracowanie charakterystyki zależności strat ciśnienia od natężenia przepływu. Charakterystyka ta ma znaczenie nie tylko podczas doboru pomp i projektowania instalacji współpracujących z działkiem wodno-pianowym, lecz została również wykorzystana w opracowanym przez autorów systemie sterowania. Umożliwia ona automatyczną regulację stopnia otwarcia przepustnicy w zależności od wymaganej odległości podawania środka gaśniczego oraz aktualnych parametrów pracy układu.

Przeprowadzone badania ogniowe potwierdziły skuteczność działania systemu automatycznej detekcji oraz naprowadzania strumienia. Uzyskane czasy reakcji i dokładność pozycjonowania wskazują na możliwość zastosowania rozwiązania w systemach ochrony przeciwpożarowej obiektów przemysłowych i magazynowych, w których wymagany jest duży zasięg działania oraz szybka reakcja na pojawiające się zagrożenia pożarowe.

9. Wnioski

Na podstawie przeprowadzonych badań hydraulicznych, badań na stanowisku ogniowym oraz analiz numerycznych CFD sformułowano następujące wnioski:

9. Badane działko wodno-pianowe umożliwia skuteczne podawanie środka gaśniczego na odległość dochodzącą do około 100 m, co pozwala na jego wykorzystanie w ochronie obiektów wielkopowierzchniowych.
10. Wraz ze wzrostem ciśnienia roboczego obserwuje się zwiększenie zasięgu strumienia, przy jednoczesnym wzroście strat ciśnienia w układzie hydraulicznym.
11. Największy zasięg strumienia uzyskano dla kąta nachylenia działka wynoszącego około 30°, co jest zgodne z obserwacjami publikowanymi dla działek przeciwpożarowych.
12. Wyznaczona charakterystyka strat ciśnienia w funkcji natężenia przepływu może być wykorzystana zarówno podczas doboru urządzeń zasilających, jak i w algorytmach automatycznej regulacji stopnia otwarcia przepustnicy zastosowanych w opracowanym systemie sterowania.
13. Analizy numeryczne CFD wykazały wysoką zgodność z wynikami badań eksperymentalnych, co potwierdza poprawność opracowanego modelu obliczeniowego
14. W analizowanym zakresie parametrów pracy nie stwierdzono występowania warunków sprzyjających kawitacji, co potwierdza poprawność przyjętych rozwiązań konstrukcyjnych układu hydraulicznego.
15. Wyniki analiz CFD umożliwiły określenie stopnia otwarcia układu przepływowego zapewniającego maksymalny zasięg strumienia oraz wspomagają optymalizację parametrów pracy urządzenia.
16. Opracowany przez autorów system gaśniczy, integrujący działko wodno-pianowe, system detekcji termowizyjnej oraz układ automatycznego sterowania, zapewnia skuteczne wykrywanie zagrożeń i automatyczne naprowadzanie strumienia środka gaśniczego.
17. Uzyskane czasy reakcji systemu (1–2 s) oraz czas ustawienia działka (ok. 9 s) wskazują na wysoką dynamikę działania układu i możliwość jego zastosowania w systemach wymagających szybkiej reakcji na rozwijające się zagrożenia pożarowe.
18. Przeprowadzone badania potwierdziły możliwość zastosowania opracowanego rozwiązania w systemach ochrony przeciwpożarowej hal magazynowych, zakładów przemysłowych, placów składowych oraz innych obiektów wymagających dużego zasięgu działania i automatyzacji procesu gaszenia.

10. Literatura

- [1] Drysdale, D. (2011). *An introduction to fire dynamics*. John Wiley & sons.
- [2] Duan, L., & Hou, X. (2021). Review of automatic fire water monitor system. *Journal of Physics Conference Series*, 1894(1), 012013. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1894/1/012013>
- [3] European Committee for Standardization. (2019). EN 12845:2015+A1:2019. Fixed firefighting systems—Automatic sprinkler systems—Design, installation and maintenance
- [4] Fan, Q., Deng, Q., & Liu, Q. (2024). Research and application on modeling and landing point prediction technology for water jet trajectory of fire trucks under large-scale scenarios. *Scientific Reports*, 14(1), 21950. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-72476-y>
- [5] Farrell, K., Hassan, M. K., Hossain, M. D., Ahmed, B., Rahnamayezekavat, P., Douglas, G., & Saha, S. (2023). Water mist fire suppression systems for building and industrial applications: Issues and challenges. *Fire*, 6(2), 40. <https://doi.org/10.3390/fire6020040>
- [6] Grant, G., Brenton, J., & Drysdale, D. (2000). Fire suppression by water sprays. *Progress in Energy and Combustion Science*, 26(2), 79–130. [https://doi.org/10.1016/s0360-1285\(99\)00012-x](https://doi.org/10.1016/s0360-1285(99)00012-x)
- [7] Karlsson, B., & Quintiere, J. G. (2000). *Enclosure fire dynamics*. CRC press.
- [8] NFPA 13. (2022). *Standard for the Installation of Sprinkler Systems*. Quincy, MA: National Fire Protection Association
- [9] Ponziani, F. A., & Tinaburri, A. (2015). Water jet streams modeling for firefighting activities with the aid of CFD. *WIT Transactions on the Built Environment*, 151, 323–334. <https://doi.org/10.2495/SAFE150281>
- [10] Ren, X., Qu, K., Guo, J., Yin, H., & Huang, B. (2025). Research on accurate fire source localization and seconds-level autonomous fire extinguishing technology. *Scientific Reports*, 15(1), 17135. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-01830-5>
- [11] Robinet, A., & Chetehouna, K. (2024). A review of additives for water mist fire suppression systems. *Fire Technology*, 60(5), 2923–2961. <https://doi.org/10.1007/s10694-024-01570-4>
- [12] Sousa, M. J., Moutinho, A., & Almeida, M. (2020). Thermal infrared sensing for near Real-Time Data-Driven fire detection and Monitoring systems. *Sensors*, 20(23), 6803. <https://doi.org/10.3390/s20236803>
- [13] Xin, Y., Thummuluru, S., Jiang, F., Yin, R., Yao, B., Zhang, K., & Liu, B. (2013). An experimental study of automatic water cannon systems for fire protection of large open spaces. *Fire Technology*, 50(2), 233–248. <https://doi.org/10.1007/s10694-013-0363-4>
- [14] Zhu, P., Xu, Z., Zhang, J., Shao, Q., Chen, W., & Ai, H. (2024). Numerical study on fire suppression by water mist in aircraft cargo compartments: Effects of spray pattern, droplet size, and nozzle layout. *Fire*, 7(12), 481. <https://doi.org/10.3390/fire7120481>

Podziękowania

Prace badawczo – rozwojowe zostały współfinansowane ze środków Europejskiego Funduszu Rozwoju Regionalnego w ramach Programu Operacyjnego Inteligentny Rozwój 2014–2020. Projekt pt. „Opracowanie innowacyjnego automatycznego układu sterowania zintegrowanego z przeciwpożarowym działem wodnopianowym z detekcją termowizyjną i/lub światłowodową” (nr umowy: POIR.01.01.01-00-1524/20).

Autorzy składają podziękowania firmie Anita Siwek ASPROJEKT oraz wszystkim wykonawcom i podwykonawcom zaangażowanym w realizację zadań projektowych.

Nowe życie dojrzałych złóż. Cyfryzacja zwiększa efektywność wydobywania

ORLEN S.A. – Zespół Oddziałów Upstream Polska



W obliczu utrzymującej się niepewności geopolitycznej oraz zmienności rynków surowcowych, bezpieczeństwo energetyczne państwa coraz wyraźniej opiera się na racjonalnym wykorzystaniu własnych zasobów. Oznacza to, że obok poszukiwania nowych złóż kluczowe znaczenie ma efektywne zarządzanie tymi, które są już eksploatowane – często od wielu dekad.

Dojrzałe złoża ropy naftowej i gazu ziemnego nie muszą być postrzegane jako schyłkowe aktywa. Praktyka pokazuje coś przeciwnego – przy właściwym podejściu technologicznym i operacyjnym mogą one nadal odgrywać istotną rolę w krajowym systemie energetycznym. Dzięki cyfryzacji, analityce danych i precyzyjnie dobranym działaniom inżynierskim możliwe jest nie tylko przedłużenie ich eksploatacji, ale też zwiększenie poziomu wydobywania.



Źródło: materiały własne ORLEN S.A.

Złoże w chmurze, czyli cyfrowy bliźniak

Transformacja cyfrowa sektora poszukiwań i wydobywania staje się dziś standardem. Takie narzędzia jak chmura obliczeniowa, symulacje złożowe, sztuczna inteligencja (AI) i uczenie maszynowe (ML), wspierają procesy decyzyjne na każdym etapie – od monitorowania pracy instalacji po optymalizację pracy odwiertów i infrastruktury powierzchniowej. Cyfryzacja jawi się zatem jako fundament nowoczesnego upstreamu.

Istotnym elementem nowoczesnego podejścia jest wykorzystanie koncepcji cyfrowego bliźniaka, czyli wirtualnego modelu kopalni integrującego dane o złożu, odwiertach oraz instalacjach technologicznych. Takie rozwiązanie, stosowane przez ORLEN, pozwala na analizę wzajemnych zależności pomiędzy poszczególnymi elementami systemu i identyfikację rzeczywistych ograniczeń produkcyjnych.

Dzięki temu operatorzy mogą szybciej identyfikować potencjalne ograniczenia, prognozować zachowanie złoża oraz reagować na pojawiające się ryzyka. To przekłada

się na bardziej stabilną produkcję, lepsze wykorzystanie istniejących instalacji i zwiększenie efektywności całego systemu.

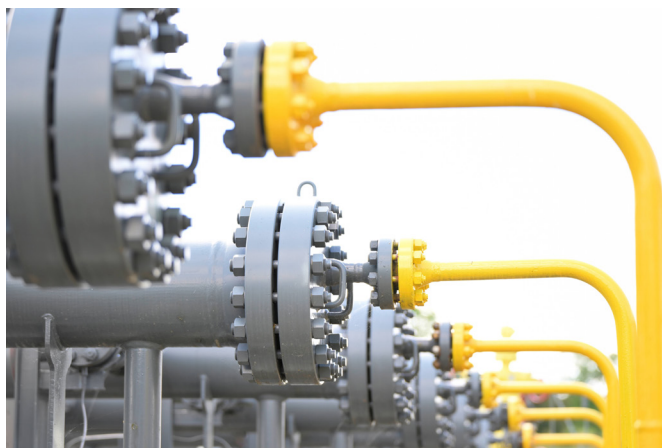
Wiedza inżynierska w połączeniu z algorytmami AI i ML umożliwia bardziej precyzyjną optymalizację pracy instalacji, poprawę efektywności energetycznej oraz wsparcie decyzji operacyjnych. W przypadku odwzorowanej cyfrowo Kopalni Gazu Ziemnego Kościan-Brońsko narzędzia te przyczyniły się m.in. do zwiększenia produkcji z wybranych odwiertów i usprawnienia zarządzania procesami wydobywczymi.

Jednocześnie należy podkreślić, że implementacja takich rozwiązań wymaga każdorazowo analizy opłacalności oraz dopasowania do specyfiki konkretnego aktywa.

Od symulacji do wdrożenia: jak zwiększać wydobywanie

Wspomniana kopalnia Kościan-Brońsko – jeden z największych ośrodków eksploatacji gazu w Polsce – jest wymownym przykładem kompleksowego podejścia do intensyfikacji wydobywania. Kluczowym elementem projektu modernizacyjnego była instalacja systemu sprężarek gazu, zaprojektowana właśnie z wykorzystaniem zaawansowanych modeli cyfrowych oraz doświadczenia inżynierów.

Zastosowanie zintegrowanego modelu obejmującego złożę, odwierty, sieć przesyłową i infrastrukturę wydobywczą umożliwiło precyzyjne określenie wąskich gardeł systemu produkcyjnego oraz dobór optymalnych rozwiązań technicznych. Uruchomienie czterech sprężarek we wrześniu 2024 r. ma pozwolić – w perspektywie do 2044 r. – na wydobywanie dodatkowych nawet 10 mld m³ gazu oraz wydłużenie eksploatacji złoża o ponad dekadę.



Źródło: materiały własne ORLEN S.A.

To potwierdza, że odpowiednio ukierunkowane inwestycje mogą znacząco zwiększyć efektywność nawet w przypadku złóż o zaawansowanym stopniu wyeksploatowania. Uświadamia zarazem, że same narzędzia cyfrowe nie ge-

nerują wzrostu wydobycia – kluczowe znaczenie ma ich świadome wykorzystanie, jako narzędzia wsparcia kompetencji inżynierskich dla usprawnienia procesów zaawansowanej i czasochłonnej analityki naftowej. Dobrym przykładem jest złożo Grotów, gdzie jednym z elementów programu intensyfikacyjnego było zwiększenie wydobycia ze złoża przy użyciu specjalistycznych płynów stymulujących. Zabieg ten pozwolił przywrócić stabilną produkcję w odwiertach o obniżonej wydajności, gdzie eksploatacja od wielu lat była zaniechana.

Równolegle rozwijane są technologie monitoringu, w tym systemy światłowodowe instalowane w odwiertach. Umożliwiają one ciągłą obserwację warunków pracy na całej długości otworu, co przekłada się na szybszą diagnostykę problemów i lepsze dopasowanie działań interwencyjnych i optymalizujących wydobycie.

Nowoczesny upstream: synergia technologii i doświadczenia

Znaczna część złóż w Polsce znajduje się obecnie w zaawansowanej fazie eksploatacji. Wiąże się to z istotnymi wyzwaniami technicznymi, takimi jak spadek ciśnienia złożowego, zużycie infrastruktury czy pogarszające się warunki produkcyjne. Dlatego ORLEN rozwija podejście polegające na intensyfikacji wydobycia z krajowych złóż ropy i gazu, integrując nowoczesne technologie, rozwiązania cyfrowe, zaawansowaną analitykę danych oraz doświadczenie operacyjne zespołów upstream. Dzięki temu

możliwe jest dalsze efektywne pozyskiwanie węglowodorów.

Zasadniczą rolę odgrywa tu zdolność do kompleksowego rozumienia procesów zachodzących w złożu oraz ich wpływu na całość systemu produkcyjnego. Integracja danych i wykorzystanie modeli cyfrowych pozwalają nie tylko utrzymać stabilność wydobycia, lecz także wydłużyć cykl życia aktywów i poprawić ich rentowność.

Choć nowoczesne technologie odgrywają istotną rolę, to ostateczny sukces projektów intensyfikacyjnych zależy od kompetencji zespołów. Wiedza geologiczna, inżynieria złożowa, doświadczenie eksploatacyjne oraz umiejętność analizy danych tworzą fundament skutecznego zarządzania aktywami upstreamowymi.

Dzięki temu możliwe jest zwiększanie wydobycia, bazującego nie tylko na nowych odkryciach. Coraz większe znaczenie mają prowadzone obecnie na dużą skalę działania optymalizujące eksploatację z obecnych struktur geologicznych i rewitalizacja starych złóż, pozwalające przywrócić wydobycie do poziomu komercyjnego. Przekłada się to zarówno na wyniki operacyjne, jak i na wzmacnianie bezpieczeństwa energetycznego kraju.

Współczesny upstream to więc nie tylko technologia, ale przede wszystkim umiejętne łączenie danych, narzędzi analitycznych i praktyki inżynierskiej. Przykłady realizowane przez ORLEN pokazują, że dojrzałe złoża wciąż mogą stanowić istotne i efektywne źródło krajowej produkcji węglowodorów.



Źródło: materiały własne ORLEN S.A.

Spółeczna odpowiedzialność w kontekście przedsiębiorstw wodociągowo-kanalizacyjnych

Social responsibility in context of water and sewage companies

Jakub Fenert^{1*} , Monika Żubrowska-Sudoł¹ , Katarzyna Iwińska² 

¹ Wydział Inżynierii Środowiska, Politechnika Warszawska

² Instytut Socjologii, Uniwersytet Civitas

*Kontakt / Correspondence: jakub@fenert.pl

Streszczenie:

W niniejszym artykule przedstawiono przegląd literatury na temat społecznej odpowiedzialności w kontekście przedsiębiorstw wodociągowo-kanalizacyjnych. Przeprowadzono analizę trzech perspektyw: społecznej odpowiedzialności przedsiębiorstwa (CSR), odpowiedzialnego prowadzenia badań i wdrażania innowacji (RRI) oraz oceny środowiskowej, społecznej i ładu korporacyjnego (ESG). Wyniki przeglądu odniesiono do sektora wod-kan. Można stwierdzić, że społeczna odpowiedzialność może przynieść korzyści przedsiębiorstwom przedmiotowego sektora, a CSR stanowi dobry punkt wyjścia do oceny i porównania zaangażowania w społeczną odpowiedzialność.

Słowa kluczowe: Społeczna odpowiedzialność biznesu, branża wodociągowo-kanalizacyjna, przedsiębiorstwo wodociągowo-kanalizacyjne, CSR, RRI, ESG, zrównoważony rozwój

Abstract:

This article presents a review of the literature on social responsibility of the water and wastewater companies. An analysis was carried out of three perspectives: corporate social responsibility (CSR), responsible research and innovation (RRI), and environmental, social and corporate governance (ESG). The findings of the review were applied to the context of the water and wastewater sector. It can be concluded that social responsibility can bring benefits to companies in this sector, and that CSR provides a good starting point for assessing and comparing commitment to social responsibility.

Keywords: Corporate social responsibility, water and wastewater sector, water and sewage company, CSR, RRI, ESG, sustainability

1. Wprowadzenie

Biorąc pod uwagę definicję społecznej odpowiedzialności (SO) jak i zrównoważonego rozwoju można wywnioskować, że przedsiębiorstwa branży wodociągowo-kanalizacyjnej powinny uwzględniać SO i działania na rzecz zrównoważonego rozwoju w swojej misji i credo organizacji. Według danych GUS [1], w wodę z sieci wodociągowej zaopatrywane jest 95,3% gospodarstw domowych w Polsce. Tym samym działalność prowadzona przez przedsiębiorstwa wodociągowo-kanalizacyjne obejmuje większość obywateli naszego kraju. Jednocześnie zasoby wody znajdują się pod coraz większą presją ze względu na rosnące zapotrzebowanie i spadającą jakość [2]. European Environment Agency szacuje, że średnio 30% terytorium Unii Europejskiej i co trzeci jej mieszkańiec co roku dotknięty jest niedoborami wody, a według danych Eurostatu Polska jest jednym z krajów

o najniższych zasobach wody na mieszkańca [3, 4]. Pomimo tych zależności, temat społecznej odpowiedzialności przedsiębiorstw wodociągowo-kanalizacyjnych pozostaje słabo rozpoznany w literaturze naukowej. Liczba publikacji dotyczących zagadnienia SO z uwzględnieniem branży wodociągowo-kanalizacyjnej jest niewielka. Artykuły związane z SO zaczynają uwzględniać przedsiębiorstwa sektora dopiero od 2001 roku. Od tego momentu opublikowano 349 pozycji, co stanowi 0,5% liczby pozycji poruszających temat SO opublikowanych od 2001 roku (69 143 artykuły).

Społeczna odpowiedzialność (SO) stanowi formę samoregulacji oraz zapewnienia zgodności organizacji z prawem, standardami etycznymi i normami społecznymi [5]. Począwszy od lat 70. XX firmy zaczęły dostrzegać, że nieuwzględnienie społecznych oczekiwań dotyczących wpływu ich działalności na ludzi i środowisko może stanowić ryzyko biznesowe. Równocześnie

w literaturze akademickiej pojawiło się wiele publikacji przedstawiających różne podejścia do SO: ekonomiczne, filozoficzne i etyczne [5–7].

W niniejszym artykule za definicję SO przyjęto definicję wskazaną w normie ISO 26000:2010 *Wytyczne dotyczące społecznej odpowiedzialności* [8]. Przywołana norma definiuje SO jako „odpowiedzialność organizacji za wpływ jej decyzji oraz działań (w tym produktów, procesów, usług) na społeczeństwo i środowisko, poprzez jawne i etyczne podejście do działalności” [8]. Podejście to musi spełniać cztery warunki: 1) Wspierać zrównoważony rozwój, w tym zdrowie i dobrobyt społeczeństwa. 2) Brać pod uwagę oczekiwania interesariuszy. 3) Być zgodne z prawem oraz spójne z międzynarodowymi standardami zachowania (powszechnie uznanymi założeniami i aktami prawa międzynarodowego, traktatami, konwencjami). 4) Być wdrożone w całej organizacji i aktywnie praktykowane.

We współczesnej terminologii SO jest nierozdzielnie połączona ze zrównoważonym rozwojem, mimo, że to drugie pojęcie zostało stworzone nieco później. Raport Brundtland określa zrównoważony rozwój jako rozwój społeczno-ekonomiczny współczesnych społeczeństw polegający na zaspokajaniu ich potrzeb bez narażania zdolności przyszłych pokoleń do zaspokojenia własnych potrzeb [9, 10].

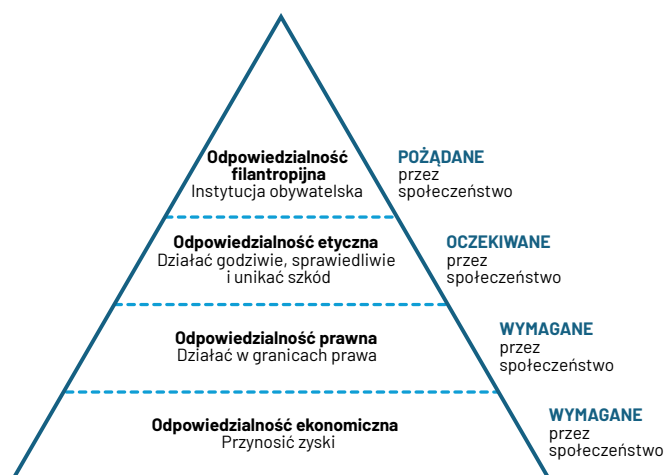
Rosnące zainteresowanie tematem, przejawiające się w działaniach podejmowanych przez przedsiębiorstwa wodociągowo-kanalizacyjne, wykraczających poza ich obowiązki prawne, czyni go wartościowym do zbadania. W niniejszym artykule przedstawiono przegląd literatury na temat SO i podjęto próbę jego syntezy, ze szczególnym uwzględnieniem kontekstu wynikającego ze specyfiki sektora wodociągowo-kanalizacyjnego.

2. Społeczna odpowiedzialność jako przedmiot badań

W literaturze istnieje kilka podejść do SO. W artykule zostaną omówione i porównane trzy z nich: Corporate Social Responsibility (*społeczna odpowiedzialność przedsiębiorstwa*), Responsible Research and Innovation (*odpowiedzialne prowadzenie badań i wdrażanie innowacji*) oraz Environment, Social and Corporate Governance (*ocena środowiskowa, społeczna i ładu korporacyjnego*).

2.1. Corporate Social Responsibility (CSR)

Podczas gdy SO może być aplikowana do dowolnych podmiotów (*przedsiębiorstw, organizacji rządowych i pozarządowych, mediów*), CSR (*społeczna odpowiedzialność przedsiębiorstwa*) w literaturze zazwyczaj powiązany jest z organizacjami, których najważniejszym celem jest generowanie zysku i pomnażanie kapitału. Według Carrolla [11], którego prace o CSR uważane są za przełomowe [12, 13], odpowiedzialność przedsiębiorstwa ukształtowana jest z czterech obszarów, które pozwalają lepiej scharakteryzować obowiązki przedsiębiorstwa wobec społeczeństwa. Model opracowany przez Carrolla przedstawia rys. 1.



Rys. 1. Model społecznie odpowiedzialnego przedsiębiorstwa wg Carrolla. Opracowanie własne na podst. [6, 11]

Fig. 1. Carroll's model of socially responsible enterprise. Source: own, based on [6, 11]

Fundamentem przedsiębiorstwa jest odpowiedzialność ekonomiczna wobec społeczeństwa, która wymaga, aby były one przede wszystkim rentowne. Podmiot gospodarczy tworzy zysk poprzez wytwarzanie wartości dodanej do społeczeństwa, a w tworzeniu jej przynosi korzyści wszystkim interesariuszom [11]. Odpowiedzialność ekonomiczna stanowi tym samym najważniejszą zasadę, bo to na niej opierają się pozostałe rodzaje odpowiedzialności. Odpowiedzialność prawna oznacza, że przedsiębiorstwo w ramach wypracowywania zysku zobowiązane jest do działania w ramach ustanowionych granic prawa. W regulacjach prawnych znajduje się odzwierciedlenie wartości wyznawanych przez społeczeństwo. Zawężenie perspektywy tylko do dwóch najbardziej podstawowych wymiarów odpowiedzialności ma ograniczenia – organy stanowiące prawo nie są w stanie przewidzieć i uregulować wszystkich okoliczności [13]. Odpowiedzialność etyczna wykracza poza zapisy prawa, do których należy się dostosować, aby móc prowadzić działalność, a wchodzi w sferę sprostania oczekiwaniom, jakie stawia społeczeństwo. Oznacza to trzymanie się nie tylko litery prawa, ale również jego intencji. Kolejnym aspektem jest oczekiwanie, że przedsiębiorstwo będzie prowadziło swoją działalność w sposób sprawiedliwy i uczciwy również wtedy, kiedy istniejące prawo nie przedstawia obowiązujących ścieżek postępowania [11]. Ostatni stopień odpowiedzialności, odpowiedzialność filantropijna, wiąże się z poświęceniem części zasobów – materialnych i niematerialnych – na rzecz społeczeństwa. Te działania nie są wymagane ekonomicznie ani prawnie, a także najczęściej nie wynikają z oczekiwań społeczeństwa wobec biznesu. Działania te podejmowane są z czystej chęci rozwoju społeczeństwa, znalezienia odpowiedzi na jego problemy i poprawy jakości życia ludzi [11, 13].

Część autorów rozróżnia CSR techniczny, równolegle istniejący z CSR instytucjonalnym [14, 15]. CSR techniczny odnosi się głównie do działań organizacji wobec interesariuszy głównych (wpływających bezpośrednio na organizację), takich jak klienci (produkt), pracownicy i sfera ładu korporacyjnego. Te akcje, polegające np. na poprawie jakości produktów lub zapewnienie benefitów pracowniczych, są często natury reakcyjnej i traktowane są jako koszt prowadzenia działalności [15]. CSR instytucjonal-

ny obejmuje działania dotyczące interesariuszy, którzy mogą wpływać na organizację jedynie pośrednio, jak np. społeczności lokalne lub środowisko naturalne, a przykładem akcji w tym zakresie są decyzje na rzecz wdrażania zielonych, zeroemisyjnych technologii lub przekazywania części wypracowanego zysku na rzecz społeczności [15, 16].

Wirba [17] argumentuje, że wdrożenie CSR pozwala osiągnąć balans pomiędzy uzyskaniem akceptacji interesariuszy i właścicieli firmy, a spełnieniem celów ekonomicznych, środowiskowych i społecznych (tzw. „Triple bottom line”). W swych podstawach CSR jest niczym innym jak zarządzaniem kosztami i korzyściami działalności przedsiębiorstwa dla wszystkich interesariuszy: począwszy od pracowników, przez inwestorów, dostawców, klientów, aż po otoczenie społeczne [17, 18]. Etikan [19] zaznacza, że podejmowanie działań CSR na rzecz środowiska oraz społeczeństwa, transparentna komunikacja, postawa lidera i dopasowane strategię w istotny sposób wpływają na odbiór przedsiębiorstwa przez interesariuszy. Jiang [20] stwierdza, że aktywne zaangażowanie pracowników w działania CSR i spójny język komunikacji również wpływają na poprawę reputacji spółki.

W swoim artykule Du [15] stwierdza, że wdrożenie CSR w organizacji zależy nie tylko od uznania istotnej roli tych działań w sprostaniu oczekiwaniom interesariuszy i osiągnięciu zrównoważonego rozwoju, ale również od podejścia do zarządzania osób na stanowiskach kierowniczych. W pracy wykazała, że transformacyjny styl zarządzania (oparty na przedstawianiu wzoru do naśladowania, rozumieniu potrzeb pracowników, kwestionowaniu utartych sposobów rozwiązywania problemów) jest przydatny w tworzeniu i inicjowaniu społecznie odpowiedzialnych działań. Styl transakcyjny (oparty na jasnej komunikacji korzyści wynikających ze sprostania postawionym, klarownym wymaganiom oraz na bieżącym monitorowaniu wykonywania zadań w celu wykrycia i zapobieżenia problemom) jest skuteczny w ich wdrażaniu i osiąganiu korzyści biznesowych. Takie pluralistyczne podejście tworzy sytuację „win-win” – satysfakcji celów ekonomicznych organizacji przy jednoczesnym utrzymaniu wsparcia inicjatyw CSR [15].

Porter i Kramer [7] równolegle wskazują, że mimo ambitnego i szczytnego celu implementacja CSR w istniejących politykach firmowych pozostawia wiele do życzenia. Jest to, według nich, spowodowane dwoma czynnikami. Po pierwsze, wywieranie presji zewnętrznej na firmy, by prowadziły działania CSR, nastawia przeciwko sobie interes biznesowy i społeczeństwo, podczas gdy są one od siebie wzajemnie zależne. Po drugie, działania zgodne z oczekiwaniami grup nacisku sprawia, że działania są ogólne, niedopasowane do specyfiki firmy i mają minimalny wpływ społeczny. Autorzy zauważyli również, że osobom na stanowiskach wykonawczych często brakuje zewnętrznego oparcia (np. w formie aktów prawnych, modeli, schematów działania), przez co ich decyzje nie są podejmowane z pewnością co do ich skuteczności. Tak prowadzone działania CSR bardzo często nie były ani strategiczne, ani operacyjne, a jedynie „kosmetyczne” w formie kampanii medialnych. Porter i Kramer [7] wyciągają wniosek, że aby CSR był wartościowy, należy włączyć go w realia biznesowe i nadać mu wartość strategiczną, a inicjatywy CSR powinny tworzyć wartość dodaną dla obu stron – organizacji i jej interesariuszy.

2.2. Responsible Research and Innovation (RRI)

Odpowiedzialne prowadzenie badań i wdrażanie innowacji (RRI – Responsible Research and Innovation) jest definiowane w literaturze jako jawny proces, w którym interesariusze procesu badawczo-rozwojowego (B&R) wspólnie działają w celu uwzględnienia w nim potrzeb, wartości i oczekiwań społeczeństwa: odbiorców innowacji. Szczególną cechą RRI jest przesunięcie zakresu analizy z efektów na cały proces B&R – pozwala to na dostrzeżenie wpływu społecznego pierwszych stadiów badań, który mógłby zostać przytłumiony przez pryzmat potencjalnych korzyści [21, 22]. Wprowadzone przez Owena pojęcie „europejskiego modelu RRI” charakteryzuje się tym, że jako wartości przyświecające RRI zostały przypisane te wynikające z Konstytucji dla Europy, a ich osiągnięcie powinno być etycznie akceptowalne, społecznie pożądane, bezpieczne i zrównoważone [22, 23]. Komisja Europejska – w swoich działaniach sięgających 2011 roku – wyróżniła pięć filarów RRI [22, 24, 25]: 1) Zaangażowanie społeczne. 2) Otwarty dostęp. 3) Równość płci. 4) Etyka. 5) Popularyzacja nauki.

Owen [22] określa cztery czynniki stanowiące podstawę ideową funkcjonowania RRI, a mianowicie: 1) Opis i analiza wpływów (anticipation). 2) Refleksja nad procesem i jego niewiadomymi (reflexivity). 3) Inkluzywność (inclusivity). 4) Odpowiedzialność (responsibility). Pierwszy czynnik polega na opisanie i przeanalizowaniu zakładanych oraz potencjalnych niezakładanych skutków ekonomicznych, społecznych, środowiskowych i innych. Nie ma on służyć przewidywaniu przyszłości, a zadawaniu serii coraz bardziej szczegółowych pytań „co by się stało, gdyby...”, co pozwala na odkrycie nowych sposobów, w jaki możemy myśleć o analizowanym procesie B&R. Drugi czynnik polega na głębokim zastanowieniu się jakie są leżące u podstawy procesu cele, motywacje oraz w jaki sposób będzie wpływał na społeczeństwo; jakie są atuty, wiedza i realia prawne; a także, co nie jest wiadome, jakie są przyjęte założenia, ryzyka, obszary niewiedzy oraz dylematy etyczne, z którymi będzie musiał zmierzyć się zespół badawczy. Trzeci czynnik – inkluzywność – to otwarcie się na poddanie wcześniejszych refleksji i analiz konsultacjom i procesom dialogu z szerokim gronem interesariuszy. Wysłuchanie wielu perspektyw może pozwolić zauważyć kwestie, które nie zostały zidentyfikowane na wcześniejszych etapach. Innowacja jest kontekstem specyficznym: wielowymiarowym, interdyscyplinarnym, niepewnym i nieprzewidywalnym. Ostatni czynnik – odpowiedzialność – musi zatem być rozumiany szerzej niż dotychczas. Odpowiedzialność za proces RRI powinna być rozszerzona na uniwersytety, innowatorów, przemysł, sektor publiczny i finansowy, a na końcu wspierana debatą publiczną. Istotne jest nie tylko ich zaangażowanie, ale również poczucie odpowiedzialności za swój udział w tym procesie. Owen [22] zaznacza, że te czynniki nie są niczym nowym, ale to instytucjonalna integracja tych procesów jest ważnym, nawet jeśli tylko ewolucyjnym, wkładem RRI w lepszą, bardziej zrównoważoną przyszłość. Dużą uwagę należy zwrócić na to, aby na poziomie regulacyjnym cele i motywacje stojące za RRI były jasne i zrozumiałe dla uczestników procesu [22, 25].

Stahl [25] obserwuje, że filary RRI dostrzegane są tylko czę-

ściowo, np. zaangażowanie społeczne jest postrzegane jako wyciąganie ręki do użytkownika końcowego, a nie angażowanie wszystkich interesariuszy w tworzenie innowacji od samego początku. Więcej uwagi poświęca się aspektom rynkowym, a działania odpowiedzialne utożsamia się z analizą i zarządzaniem ryzykiem. Autor zauważa również, że przedsiębiorstwa wykazują się znacznie bliższym horyzontem czasowym w określaniu celi RRI, niż ten proponowany w ramach literaturowego dyskursu o RRI. Na zakończenie wskazuje, że chociaż wyzwaniem jest kwantyfikacja wyników, jakie RRI może przynieść dla przedsiębiorstwa, RRI może spełnić rolę istotnego czynnika wspomagającego ocenę technologii, gdy jeszcze nie ma ram prawnych ani nie funkcjonują ustalone sposoby postępowania.

Warto zwrócić uwagę na dyskusję w literaturze dotyczącą różnic między CSR a RRI. Według niektórych autorów, chociaż istnieją pomiędzy nimi podobieństwa, tak RRI jest pojęciem pojemniejszym i wpływającym na całą strukturę organizacji [21]. Gurzawska et al. [26] wskazują, że RRI jest mechanizmem oddórnym, wykorzystywanym jako dźwignia do wdrożenia pożądaných polityk i podejść, podczas gdy CSR jest mechanizmem oddolnym, wspierającym biznes w działaniu zgodnym z prawem i międzynarodowymi standardami. Konkludują, że strategie CSR nie są w stanie osiągnąć dla społeczeństwa i przemysłu takich korzyści jak RRI, chociaż koncept RRI trzeba odpowiednio zaadaptować do realiów biznesowych. Van-de-Poel [27] ma inną interpretację: dla niego RRI ma na celu wczesne określenie skutków procesu innowacji, podczas gdy CSR ma zapewnić etyczne funkcjonowanie i branie pod uwagę interesów i potrzeb interesariuszy. Nie przeciwstawia sobie tych pojęć, zauważa, że wdrożenie RRI w ramach strategii CSR jest możliwe i będzie oznaczać przejście z polityk odpowiedzi obronnych na aktywne zaangażowanie w kwestie społeczne, środowiskowe i etyczne. O tej kwestii pisał również Porter i Kramer [7] na kilka lat przed powstaniem pojęcia RRI. Autorzy wskazali, że firma, która widzi CSR jako narzędzie do pacyfikowania presji zewnętrznej, często obserwuje, jak jej podejście zmienia się w serię reakcji defensywnych – bez biznesowego uzasadnienia i z minimalną wartością dla społeczeństwa. Stahl [25] stwierdził, że istnieje korelacja pomiędzy rozmiarem przedsiębiorstwa a stopniem rozwinięcia strategii CSR i stopniem włączania w nią idei RRI. Proponuje, aby koncepty i założenia RRI tworzyły pomost pomiędzy celami zrównoważonego rozwoju oraz CSR organizacji, a jej działaniami badawczo-rozwojowymi.

2.3. Environment, Social and Corporate Governance (ESG)

Ocena środowiskowa, społeczna i ładu korporacyjnego, w literaturze anglojęzycznej określana jako ESG (Environment, Social and Corporate Governance), jest sposobem ilościowego określenia zaangażowania przedsiębiorstwa w zrównoważony rozwój [28]. Na ocenę ESG składają się niefinansowe wskaźniki efektywności, na podstawie których inwestorzy i inni interesariusze mogą uzyskać wgląd w sposób zarządzania firmą i jego wpływ na społeczeństwo i środowisko [29]. Przykłady mierzonych wskaźników ESG przedstawia tabela 1.

Tabela 1. Przykłady wskaźników środowiskowych, społecznych i ładu korporacyjnego. Źródło: NASDAQ ESG Reporting Guide 2.0 [30]

Table 1. Examples of environmental, social and corporate governance indicators. Source: NASDAQ ESG Reporting Guide 2.0 [30]

Wskaźniki środowiskowe	Wskaźniki społeczne	Wskaźniki ładu korporacyjnego
E1. Emisje gazów cieplarnianych	S1. Stosunek płacy zarządu do mediany wynagrodzeń	G1. Inkluzywność na stanowiskach kierowniczych
E2. Intensywność emisji	S2. Stosunek mediany płac między płacami	G2. Niezależność zarządu
E3. Zużycie energii	S3. Rotacja pracowników	G3. Zachęty finansowe
E4. Intensywność zużycia energii	S4. Inkluzywność	G4. Związki zawodowe
E5. Udział źródeł energii	S5. Pracownicy tymczasowi	G5. Postępowanie dostawców
E6. Zużycie wody	S6. Dyskryminacja	G6. Etyka i praktyki antykorupcyjne
E7. Działania środowiskowe	S7. Wypadki przy pracy	G7. Ochrona danych
E8. Zarządzanie ryzykiem klimatycznym na szczeblu kierowniczym	S8. Bezpieczeństwo i higiena pracy	G8. Raportowanie ESG
E9. Zarządzanie ryzykiem klimatycznym na szczeblu menadżerskim	S9. Praca niewolnicza i praca dzieci	G9. Ujawnianie danych
E10. Mitygacja ryzyka klimatycznego	S10. Prawa człowieka	G10. Zewnętrzna certyfikacja

U podstawy ESG leży założenie, że ujawnianie danych o działalności przedsiębiorstwa pozwala na zbudowanie dobrych relacji z interesariuszami. Istotne jest jednak, że aby móc myśleć o ESG jako mechanizmie skutecznym w egzekwowaniu społecznej odpowiedzialności firmy, musi być ono uregulowane w taki sposób, aby powstające raporty mogły być porównywane ze sobą. Spójne, usystematyzowane raportowanie niefinansowe, zwłaszcza w obszarze zrównoważonego rozwoju, jest trudne ze względu na różnice w podejściu do raportowania pomiędzy przedsiębiorstwami i brak jasno sprecyzowanych rozwiązań prawnych [31]. Akt prawny przyjęty przez Unię Europejską w postaci Corporate Sustainable Reporting Directive (CSRD) obliuguje duże przedsiębiorstwa i przedsiębiorstwa notowane na giełdach papierów wartościowych do publikacji raportów dotyczących ich zaangażowania w kwestie środowiskowe i społeczne [32]. Należy nadmienić, że zakres firm, które obecnie są zobligowane do prowadzenia oceny ESG, ulegnie modyfikacji ze względu na zmiany prawne w ramach pakietu Omnibus, które zostały wdrożone do prawodawstwa unijnego dyrektywą 2026/470 [33, 34]. Spowoduje to zawężenie zakresu i uproszczenie wymogów, co może doprowadzić do spadku rzetelności raportów.

2.4. Porównanie

W tabeli 2 podsumowano wszystkie podejścia opisane w tym rozdziale. Podejście CSR jest obecne w literaturze najdłużej i jako jedyne ma charakter oddolny. Chociaż wdrażanie działań CSR jest oczekiwane przez społeczeństwo, nie stanowi ono wymogu prawnego. W literaturze podejście to odnosi się prawie wyłącznie do podmiotów nastawionych na wypracowywanie zysku. Największym ryzykiem związanym z działaniami CSR jest ich wykluczenie z realiów biznesowych, co może przerodzić się w działania jedynie wizerunkowe, bez realnego wpływu na społeczeństwo. Podejście RRI skupia się na organizacjach i przedsię-

biorstwach prowadzących prace B&R, których części składowe mogą mieć znaczny wpływ na społeczeństwo w trakcie każdego etapu prowadzenia prac. Istotnym problemem RRI jest wyzwanie w miarodajnym określeniu wyników podjętych działań, jak również stale zmieniające się znaczenie tych działań. ESG, podobnie jak RRI, jest podejściem mającym źródło w narzuconych odgórnie wymaganiach. W przypadku ESG te wymogi wynikają z dążenia rynków kapitałowych do świadomego podejmowania decyzji finansowych. Tym samym czynnikiem niefinansowym, takim jak dbałość o środowisko, nadaje się wartość pieniężną. Największym wyzwaniem stojącym przed podejściem ESG jest spójne i usystematyzowane raportowanie, tak, aby raporty różnych firm mogły być porównywane między sobą. Co więcej, wyzwaniem jest zmiana prawa unijnego powodująca uproszczenie raportowania, a tym samym obniżająca wartość merytoryczną raportów.

Tabela 2. Podsumowanie różnych podejść do społecznej odpowiedzialności. Źródło: opracowanie własne (przygotowano na podstawie [6, 7, 11, 13, 17, 21–25, 27–29, 31])
Table 2. Summary of different social responsibility approaches. Source: Own, based on [6, 7, 11, 13, 17, 21–25, 27–29, 31]

Charakterystyka różnych podejść do społecznej odpowiedzialności			
Podejście	CSR	RRI	ESG
Cel	Osiągnięcie balansu pomiędzy celami ekonomicznymi, środowiskowymi i społecznymi (Triple bottom line)	Uwzględnienie w procesie B&R wpływu wszystkich działań, a nie tylko efektów, na społeczeństwo.	Ilościowa ocena zaangażowania przedsiębiorstwa w zrównoważony rozwój.
Charakter	Oddolny	Odgórny	Odgórny
Podstawowe wartości	Cztery rodzaje odpowiedzialności: ekonomiczna, prawna, etyczna i filantropijna	Zaangażowanie społeczne, otwarty dostęp, równość płci, etyka, popularyzacja nauki.	Jawność, dostęp do informacji, nadanie finansowej wartości czynnikom niefinansowym.
Zakres stosowania	Przedsiębiorstwa, których celem jest generowanie zysku.	Organizacje i przedsiębiorstwa prowadzące prace badawczo-rozwojowe.	Duże przedsiębiorstwa i przedsiębiorstwa notowane na giełdzie.
Ograniczenia i wyzwania	Ryzyko podjęcia działań niedopasowanych do specyfiki firmy. CSR jest często wykluczany z realiów biznesowych. Połączenie tych dwóch ograniczeń powoduje, że CSR bywa jedynie kosmetyczny i ma minimalne znaczenie społeczne.	Konieczność adaptacji idei do realiów biznesowych. Ciągła zmienność co do znaczenia i zawartości. Kwantyfikacja efektów stanowi problem.	Spójne i usystematyzowane raportowanie wymaga jasnych, sprecyzowanych regulacji prawnych. Pakiet Omnibus osłabi pozycję ESG w legislacji i zakres raportowania, co poważnie wpłynie na rzetelność raportów.

3. Społeczna odpowiedzialność w branży wodociągowo-kanalizacyjnej

Na podstawie przeglądu literatury stwierdzono, że RRI jest konceptem nastawionym na funkcjonowanie w przestrzeni, w której wdrażane są innowacje i prowadzone są badania naukowe. Małe

i średnie przedsiębiorstwa wodociągowo-kanalizacyjne rzadko prowadzą tego typu działalność, ze względu na to, że wymaga ona dużego doświadczenia kadry i zasobów finansowych. Koncept ESG jest skierowany do dużych firm i spółek giełdowych. Jedynie największe spółki wodociągowo-kanalizacyjne w kraju są objęte wymogami raportowania. Biorąc pod uwagę zróżnicowaną charakterystykę sektora, CSR jest dobrym punktem wyjścia dla porównania małych, średnich i dużych przedsiębiorstw pod kątem zaangażowania w SO. Wszystkie mają do spełnienia założenia ekonomiczne, a narzucone na nie obowiązki dotyczące zaopatrzenia ludności w wodę pitną przekraczają zakres odpowiedzialności prawnej i zaczynają dotyczyć sfery odpowiedzialności etycznej. Zasób – woda i środowisko – którym operują te przedsiębiorstwa stanowi zarówno dobro wspólne społeczeństwa, jak i podstawowe narzędzia służące do wypracowania zysku i spełnienia wymogów prawnych. Na uwagę zasługują badania prowadzone równolegle przez Kuzior et al. [35], Pawłowską et al. [12, 36] oraz Lulewicz-Sas i Godlewską [37]. Te zespoły w swych artykułach skupiają się na przedsiębiorstwach wodociągowo-kanalizacyjnych oraz określeniu bądź ocenie działań oraz praktyk, jakie podejmują te podmioty w obszarze SO.

Pawłowska et al. [12] identyfikuje lukę badawczą i stawia za cel określenie jak kształtowane są praktyki CSR w wybranym Czeskim przedsiębiorstwie wodociągowo-kanalizacyjnym przy pomocy metod jakościowych i ilościowych. Dzięki uzyskanym wynikom zmierzono efekty przynoszone przez praktyki CSR. Wywiady przeprowadzone przez autorów wskazały, że coraz większa liczba przedsiębiorstw podejmuje działania w stronę rozwoju praktyk CSR, co ma odzwierciedlenie w formułowaniu strategii, budowie relacji pomiędzy przedsiębiorstwem i interesariuszami, a także podejmowaniem działań społecznych, charytatywnych i proekologicznych w zakresie edukacji. Działania podejmowane na rzecz społeczności, pracowników i ochrony środowiska postrzegane są jako inwestycja, która wspiera przedsiębiorstwo w konkurowaniu na rynku i kształtowaniu warunków do prowadzenia zrównoważonego rozwoju. Kadra menedżerska wskazywała również na to, że należy budować świadomość interesariuszy o tym, jakie działania mogą podejmować na rzecz ochrony środowiska. Na podstawie zebranych ankiet i wywiadów autorzy wnioskuje, że wdrożenie CSR ma wpływ na rozwój koncepcji zrównoważonego rozwoju w przedsiębiorstwie przy jednoczesnym uwzględnieniu oczekiwań różnych grup interesariuszy, kształtowaniu pozytywnego obrazu firmy i podwyższeniu satysfakcji pracowników. Zostało jednak wskazane, że w badanym przedsiębiorstwie świadomość pracowników w zakresie kwestii środowiskowych i postaw proekologicznych jest znacząco niższa niż w pozostałych badanych zakresach SO. Ponadto stwierdzono, że kadra kierownicza i menedżerska ma szczególną rolę w budowaniu świadomości o społecznej odpowiedzialności przedsiębiorstwa, a dalszy rozwój tego konceptu może zostać umożliwiony poprzez wdrożenie nowoczesnych koncepcji zarządzania takich jak kultura organizacji, *organizational learning and knowledge management* lub analizy porównawcze.

Kuzior et al. [35] skupia się na odbiorze oraz ocenie działań CSR Przedsiębiorstwa Wodociągów i Kanalizacji (PWIK) w Rybniku przez zewnętrznych interesariuszy. Z wykorzystaniem metod ilościowych analizowano ocenę klientów przedsiębiorstwa doty-

cząc takich inicjatyw jak uruchomienie publicznie dostępnych dystrybutorów wody, ustawianie kurtyn wodnych w przestrzeniach publicznych w lecie, akcje promujące oszczędzanie wody i spożywanie wody wodociągowej zamiast butelkowej. Badano również inne czynniki, w tym oczekiwania dotyczące jakości wody wodociągowej, gotowość do zgłoszenia wyższego zapotrzebowania na wodę do przedsiębiorstwa, częstotliwość i cel odwiedzania witryny internetowej przedsiębiorstwa, a także świadomość inicjatyw podejmowanych przez przedsiębiorstwa na rzecz poprawy jakości środowiska. Na podstawie uzyskanych danych autorzy wnioskują, że prowadzenie kampanii społecznych zachęciło klientów do oszczędniejszego korzystania z wody i częstszego spożywania wody wodociągowej zamiast butelkowanej. Oczekiwania klientów wskazują na konieczność poprawy jakości wody wodociągowej i współpracy z instytucjami naukowymi, głównie na rzecz zapewnienia bezawaryjności i ciągłości działania sieci wodociągowej. PWiK w Rybniku, na podstawie uzyskanych wyników badań, również podjął się sprostania oczekiwaniom mieszkańców poprzez aktualizację Uchwały o Zbiorowym Zaopatrzeniu w Wodę i wprowadzenie „taryfy nocnej”, zachęcającej do podlewania ogrodów w okresach o niższym zapotrzebowaniu na wodę. Działania PWiK w Rybniku oceniane są pozytywnie, chociaż prawie 90% mieszkańców nie było w stanie wskazać inicjatyw przedsiębiorstwa na rzecz budowy świadomości ekologicznej, ponad 98% nie było w stanie wskazać działań na rzecz poprawy jakości środowiska, a ponad 99% nie wiedziało o wsparciu, które przedsiębiorstwo udziela lokalnym organizacjom.

Pawłowska et al. [36] skupia się na ocenie ładu korporacyjnego jako integralnej części praktyk CSR w ramach wybranego przedsiębiorstwa wodociągowo-kanalizacyjnego. Badano następujące wymiary ładu korporacyjnego: jawność i komunikacja procesów decyzyjnych; czy został stworzony kodeks etycznego postępowania; czy przedsiębiorstwo respektuje prawo krajowe i międzynarodowe; czy przedsiębiorstwo odpowiada na potrzeby interesariuszy oraz czy kadra menadżerska odgrywa rolę w motywowaniu pracowników. Na podstawie zebranych kwestionariuszy od pracowników i menadżerów w przedsiębiorstwie stwierdzono, że spójność w odpowiedziach udzielanych przez te dwie grupy umożliwia efektywną implementację i monitorowanie wykonywanych w przedsiębiorstwie działań CSR. Autorzy określili, że chociaż ogólny poziom ładu korporacyjnego w badanym podmiocie jest na wysokim poziomie, to transparentność w komunikacji i podejmowaniu decyzji była na niższym poziomie od pozostałych badanych elementów. Badacze wnioskują, że poprawienie przepływu informacji wewnątrz przedsiębiorstwa w pozytywny sposób wpłynie na zbudowanie środowiska opartego na zaufaniu, szczerości i wiarygodności, co może wpłynąć na efektywniejszą pracę. Wskazują również, że ważną rolę do odegrania ma organ regulacyjny, w szczególności poprzez promowanie transparentności oraz nadzorowanie zgodności ze standardami etycznymi.

Lulewicz-Sas i Godlewska [37] określają poziom komunikacji działań CSR w 510 przedsiębiorstwach wodociągowo-kanalizacyjnych zrzeszonych w Izbie Gospodarczej „Wodociągi Polskie”. Autorki wskazują na to, że w celu uzyskania widoczności działań CSR i dostępu do nich przez interesariuszy wewnętrznych i ze-

wewnętrznych konieczna jest odpowiednia komunikacja, ponieważ w innym przypadku aktywności na rzecz CSR uznawane są za nieistotne, a nawet jako negatywne [37, 38]. Na podstawie badań Morsing M. i Schultz M. [39], autorki zdefiniowały trzy strategie komunikacji CSR: strategię informowania interesariuszy, strategię odpowiedzi interesariuszy i strategię włączania interesariuszy. Strategia informowania opiera się na jednokierunkowej komunikacji, w której interesariusze mają najmniej wpływu, podczas gdy pozostałe dwie opierają się na asymetrycznej komunikacji dwukierunkowej, w której polityki i działania CSR są kształtowane albo poprzez odpowiadanie na potrzeby i zgłoszone uwagi interesariuszy, albo poprzez bezpośrednie ich włączenie w kształtowanie działań CSR na etapie ich planowania. Wyniki badań wskazują, że jedynie 189 przedsiębiorstw (37% organizacji zrzeszonych w IGWP) prezentuje na swoich stronach informacje o społecznej odpowiedzialności przedsiębiorstwa, 16 (3%) bezpośrednio informuje o wdrożeniu idei CSR i tylko jedno przedsiębiorstwo wdraża CSR w oparciu o ISO 26000.



Rys. 2. Najważniejsze źródła komunikacji w obszarze CSR w przedsiębiorstwach wodociągowo-kanalizacyjnych [37], ZR – zrównoważony rozwój

Fig. 2. Main sources of communication in the area of CSR by water and sewage companies [37]

Przedstawiony na rysunku 2 wykres obrazuje, że większość przedsiębiorstw prowadzących komunikację (57, co wedle obliczeń autorek stanowi 11,2% badanej populacji) wykorzystuje do tego celu edukację ekologiczną. Pojawiają się również informacje o podjętych działaniach prospołecznych i sponsoringowych (np. wystawianie się na wydarzeniach lokalnych, zapewnianie kurtyn wodnych, rozwijanie e-usług), natomiast jedynie pojedyncze przedsiębiorstwa publikują kody etycznego postępowania lub informacje o podjętych działaniach środowiskowych (w obydwu przypadkach 4 przedsiębiorstwa, poniżej 1%). Nieliczne badane podmioty publikowały raporty CSR, raporty zrównoważonego rozwoju lub strategię w tym zakresie. W porównaniu z zagranicznymi przedsiębiorstwami – w których procent przedsiębiorstw publikujący wspomniane raporty lub politykę CSR wynosi powy-

żej 80% – polskie przedsiębiorstwa wodociągowo-kanalizacyjne cechują się słabą komunikacją. Autorki wnioskuje, że taka sytuacja niekoniecznie oznacza, że działania nie są podejmowane, ale wskazuje na ich charakter jako pojedynczych, niepowiązanych akcji podejmowanych ad hoc, a nie jako część przemyślanej, długofalowej strategii lub planowania.

4. Podsumowanie

Z przeprowadzonego przeglądu literatury wynika, że temat społecznej odpowiedzialności w przedsiębiorstwach wodociągowo-kanalizacyjnych jest słabo rozpoznany. Można wyciągnąć wniosek, że wdrożenie społecznej odpowiedzialności pozytywnie przekłada się na funkcjonowanie podmiotów gospodarczych poprzez poprawę wizerunku, reputacji i wyników finansowych. Tworzy to nowy kierunek badań na styku nauk społecznych i technicznych. Obecne w literaturze trzy perspektywy – CSR, RRI i ESG – mogą być wykorzystane do oceny lub wspierania zaangażowania przedsiębiorstw sektora w praktyki SO. ESG umożliwia porównanie dużych przedsiębiorstw o wyższych wymogach raportowania, a RRI daje ramy do oceny wpływu badań i innowacji wdrażanych w przedsiębiorstwach wodociągowo-kanalizacyjnych. CSR obejmuje zarówno małe, średnie, jak i duże podmioty odwołując się jednocześnie do odpowiedzialności ekonomicznej, prawnej i etycznej dotyczącej zaopatrzenia ludności w wodę pitną. Z tego względu CSR może stanowić dobry punkt wyjścia do porównywania metod i zaangażowania przedsiębiorstw sektora w społeczną odpowiedzialność. W dalszych badaniach warto odejść od traktowania społecznej odpowiedzialności wyłącznie jako narzędzia wizerunkowego oraz edukacyjnego i traktować ją jako element zarządzania usługą publiczną, bezpieczeństwem dostaw wody oraz relacjami z lokalnymi społecznościami.

5. Literatura

- [1] Główny Urząd Statystyczny. *Dziedziny Bazy Wiedzy*. Dostęp: 21.02.2026 <https://dbw.stat.gov.pl>
- [2] European Environment Agency. 2024. *Europe's state of water 2024: The need for improved water resilience*. Luxembourg: Publications Office of the European Union <https://doi.org/10.2800/02236>
- [3] European Environment Agency. 2025. *Social fairness in preparing for climate change: How just resilience can benefit communities across Europe*. EEA Report 04/2025. Luxembourg: Publications Office of the European Union. <https://doi.org/10.2800/3683343>
- [4] Eurostat. 2026. Water statistics. Statistics Explained. Dostęp: 23.10.2025. https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Water_statistics
- [5] Adrian, M., Phelps, L., & Gatte, A. (2013). Philanthropy and corporate social responsibility: is giving enough to truly be ethical?. *International Journal of the Academic Business World*, 7(1), 83.
- [6] Carroll, A. B. (1979). A Three-Dimensional Conceptual model of Corporate performance. *Academy of Management Review*, 4(4), 497–505. <https://doi.org/10.5465/amr.1979.4498296>
- [7] Porter, M. E., & Kramer, M. R. (2007). Strategy and society: the link between competitive advantage and corporate social responsibility. *Strategic Direction*, 23(5), 78–92, 163. <https://doi.org/10.1108/sd.2007.05623ead.006>
- [8] ISO. 2010. ISO 26000:2010. Guidance on social responsibility. Geneva: International Organization for Standardization.
- [9] Brundtland, G. H. (1987). Our common Future—Call for action. *Environmental Conservation*, 14(4), 291–294. <https://doi.org/10.1017/s0376892900016805>
- [10] Zaman, M., Tanewski, G., & Ekanayake, G. (2025). What does sustainability mean for small and medium enterprises: A systematic literature review. *Journal of Cleaner Production*, 492, 144830. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2025.144830>
- [11] Carroll, A. B. (2016). Carroll's pyramid of CSR: taking another look. *International Journal of Corporate Social Responsibility*, 1(1). <https://doi.org/10.1186/s40991-016-0004-6>
- [12] Pawłowska, E., Machnik-Słomka, J., Klosok-Bazan, I., Gono, M., & Gono, R. (2021). Corporate Social Responsibility of Water and Sanitation Company in the Czech Republic—CASE study. *Energies*, 14(13), 3981. <https://doi.org/10.3390/en14133981>
- [13] Karaś, J. (2018). Znaczenie koncepcji społecznej odpowiedzialności biznesu w osiąganiu przewagi konkurencyjnej na rynku. *Prace Naukowe Uniwersytetu Ekonomicznego we Wrocławiu*, (543), 57–68. <https://doi.org/10.15611/pn.2018.543.05>
- [14] Godfrey, P. C., Merrill, C. B., & Hansen, J. M. (2008). The relationship between corporate social responsibility and shareholder value: an empirical test of the risk management hypothesis. *Strategic Management Journal*, 30(4), 425–445. <https://doi.org/10.1002/smj.750>
- [15] Du, S., Swaen, V., Lindgreen, A., & Sen, S. (2012). The roles of leadership styles in corporate social responsibility. *Journal of Business Ethics*, 114(1), 155–169. <https://doi.org/10.1007/s10551-012-1333-3>
- [16] Waddock, S. A. (2002). Leading corporate citizens: Vision, values, value added. *McGraw-Hill Companies, Incorporated*.
- [17] Wirba, A. V. (2023). Corporate Social Responsibility (CSR): The Role of Government in promoting CSR. *Journal of the Knowledge Economy*, 15(2), 7428–7454. <https://doi.org/10.1007/s13132-023-01185-0>
- [18] Ward, H. (2004). *Public sector roles in strengthening corporate social responsibility: taking stock*. Washington, DC: World Bank.
- [19] Etikan, J. (2024). Corporate Social Responsibility (CSR) and its Influence on Organizational Reputation. *Journal of Public Relations*, 2(1), 1–12. <https://doi.org/10.47941/jpr.1694>
- [20] Jiang, H., Cheng, Y., Park, K., & Zhu, W. (2022). Linking CSR communication to corporate reputation: understanding hypocrisy, employees' social media engagement and CSR-Related work engagement. *Sustainability*, 14(4), 2359. <https://doi.org/10.3390/su14042359>

- [21] García-Castillo, N., Bueno-Doral, T., & Hänninen, L. (2020). Responsible research and innovation (RRI) as a driving force for change in corporate communication: New forms of governance and participatory structures. *El Profesional De La Informacion*, 29(3). <https://doi.org/10.3145/epi.2020.may.13>
- [22] Owen, R., Macnaghten, P., & Stilgoe, J. (2012). Responsible research and innovation: From science in society to science for society, with society. *Science and Public Policy*, 39(6), 751–760. <https://doi.org/10.1093/scipol/scs093>
- [23] Von Schomberg, R. (2011). Prospects for technology assessment in a framework of responsible research and innovation. *SSRN Electronic Journal*. <https://doi.org/10.2139/ssrn.2439112>
- [24] Laroche, G. (2011). *Franco-British workshop on responsible innovation. From concepts to practice*. Dostęp: 15.10.2025 <https://web.archive.org/web/20110820022633/http://www.ambafrance-uk.org/Franco-British-workshop-on,18791>
- [25] Stahl, B. C., Chatfield, K., Holter, C. T., & Brem, A. (2019). Ethics in corporate research and development: can responsible research and innovation approaches aid sustainability? *Journal of Cleaner Production*, 239, 118044. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.118044>
- [26] Gurzawska, A., Mäkinen, M., & Brey, P. (2017). Implementation of Responsible Research and Innovation (RRI) practices in industry: providing the right incentives. *Sustainability*, 9(10), 1759. <https://doi.org/10.3390/su9101759>
- [27] Van De Poel, I., Asveld, L., Flipse, S., Klaassen, P., Scholten, V., & Yaghmaei, E. (2017). Company Strategies for Responsible Research and Innovation (RRI): a Conceptual model. *Sustainability*, 9(11), 2045. <https://doi.org/10.3390/su9112045>
- [28] Sikacz, H. (2024). *Ocena ESG przedsiębiorstw niebieskiej gospodarki (blue economy) (1st ed.)*. Wydawnictwo Uniwersytetu Ekonomicznego we Wrocławiu. <https://doi.org/10.15611/2024.03.0>
- [29] Kaźmierczak, M. (2022). A literature review on the difference between CSR and ESG. *Zeszyty Naukowe. Organizacja i Zarządzanie/Politechnika Śląska*, (162), 275–289. <https://doi.org/10.29119/1641-3466.2022.162.16>
- [30] Nasdaq. 2019. ESG Reporting Guide 2.0: A Support Resource for Companies.
- [31] Samborski, A. (2024). ESG reporting as a corporate governance mechanism. The case of publicly listed energy companies. *Annales Universitatis Mariae Curie-Skłodowska Sectio H Oeconomia*, 58(1), 169–183. <https://doi.org/10.17951/h.2024.58.1.169-183>
- [32] Dyrektywa Parlamentu Europejskiego i Rady (UE) 2022/2464 z dnia 14 grudnia 2022 r. w sprawie zmiany rozporządzenia (UE) nr 537/2014, dyrektywy 2004/109/WE, dyrektywy 2006/43/WE oraz dyrektywy 2013/34/UE w odniesieniu do sprawozdawczości przedsiębiorstw w zakresie zrównoważonego rozwoju. Dz.U. UE L 322 z 16.12.2022,
- [33] European Commission. 2025. Omnibus package. Dostęp: 18.11.2025. https://finance.ec.europa.eu/news/omnibus-package-2025-04-01_en
- [34] Dyrektywa Parlamentu Europejskiego i Rady (UE) 2026/470 z dnia 24 lutego 2026 r. w sprawie zmiany dyrektyw 2006/43/WE, 2013/34/UE, (UE) 2022/2464 i (UE) 2024/1760 w odniesieniu do niektórych wymogów dotyczących sprawozdawczości przedsiębiorstw w zakresie zrównoważonego rozwoju i niektórych wymogów w zakresie należytej staranności przedsiębiorstw w zakresie zrównoważonego rozwoju. Dostęp: 26.06.2026. <http://data.europa.eu/eli/dir/2026/470/oj>
- [35] Kuzior, A., Ober, J., & Karwot, J. (2021). Stakeholder expectation of corporate social responsibility Practices: A case study of PWIK Rybnik, Poland. *Energies*, 14(11), 3337. <https://doi.org/10.3390/en14113337>
- [36] Pawłowska, E., Machnik-Słomka, J., Klosok-Bazan, I., & Gono, M. (2025). Assessment of corporate governance as a key component of corporate social responsibility: A case study of a water and wastewater utility. *Sustainability*, 17(18), 8492. <https://doi.org/10.3390/su17188492>
- [37] Lulewicz-Sas, A., & Godlewska, J. (2021). Assessment of communication CSR by Polish water and sewage companies. *WSEAS Transactions on Business and Economics*, 18. <https://doi.org/10.37394/23207.2021.18.7>
- [38] Pérez, A. (2015). Corporate reputation and CSR reporting to stakeholders. *Corporate Communications an International Journal*, 20(1), 11–29. <https://doi.org/10.1108/ccij-01-2014-0003>
- [39] Morsing, M., & Schultz, M. (2006). Corporate social responsibility communication: stakeholder information, response and involvement strategies. *Business Ethics a European Review*, 15(4), 323–338. <https://doi.org/10.1111/j.1467-8608.2006.00460.x>

Humanoidalne roboty podwodne ESA-HAUV w obsłudze technicznej budowli hydrotechnicznych

Humanoid underwater robots ESA-HAUV in the technical maintenance of hydraulic structures

Witold Paleczek^{1*} 

¹ Wydział Budownictwa, Politechnika Częstochowska

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

Streszczenie:

Koncepcja humanoidalnych robotów podwodnych ESA-HAUV zakłada autonomiczne, długotrwale działające jednostki zdolne do obsługi technicznej budowli hydrotechnicznych w warunkach odcięcia od nadzoru człowieka. Systemy te łączą manipulację humanoida z hydrodynamiczną mobilnością oraz mechanizmy samokonserwacji, wzajemnej samonaprawy i pomocy, a także wytwarzanie narzędzi na wielomateriałowych drukarkach 3D. Ich energetyczna samowystarczalność umożliwia realizację zadań inspekcyjnych, serwisowych i interwencyjnych w środowisku wysokiego ryzyka przy sterowaniu zapewnianym przez AI.

Słowa kluczowe: robotyka podwodna, robot ESA-HAUV, fraktale Barnsleya, robot autonomiczny, robot humanoidalny

Abstract:

The concept of humanoid underwater robots ESA-HAUV assumes autonomous, long-operating units capable of performing technical maintenance of hydraulic structures in conditions where human supervision is unavailable. These systems combine humanoid manipulation with hydrodynamic mobility and incorporate mechanisms of self-maintenance, mutual self-repair and assistance, as well as the fabrication of tools using multimaterial 3D printers. Their energetic self-sufficiency enables inspection, servicing and intervention tasks in high-risk underwater environments under AI-based control.

Keywords: underwater robotics, ESA-HAUV robot, Barnsley fractals, autonomous robot, humanoid robot, 3D printing in robotics

1. Wstęp

Robotyka podwodna od wielu lat rozwija się w trzech głównych kierunkach: ROV (Remotely Operated Vehicle) – pojazdów zdalnie sterowanych, AUV (Autonomous Underwater Vehicle) – autonomicznych pojazdów podwodnych oraz HAUV – (Hovering Autonomus Underwater Vehicle / Hybrid Aerial Underwater Vehicle): jednostek poruszających się pod wodą oraz robotów latająco-pływających przy czym autonomia polega na tym, że robot sam planuje trasę wokół przeszkody, bez potrzeby ciągłego sterowania przez operatora, natomiast w odmianie hybrydowej: robot potrafi wystartować z lądu, lecieć nad wodę, zanurkować na głębokość nawet kilkudziesięciu metrów, a następnie wynurzyć się i ponownie odlecieć. W obiektach hydrotechnicznych techniki sanitarnej – takich jak komory ujęć wody, syfony, zbiorniki reten-

cyjne czy tunele – potrzebne są systemy: zdolne do precyzyjnej pracy w ograniczonej przestrzeni, autonomiczne energetycznie, zdolne do inspekcji i samoserwisowania, odporne na awarie, zwłaszcza współpracujące w grupie.

Wymagania te skłaniają do wyodrębnienia nowej klasy robotów: ESA-HAUV (Energy-Self-Sufficient Humanoid Autonomous Underwater Vehicle), czyli energetycznie samowystarczalnych humanoidalnych autonomicznych robotów podwodnych. Skalowalna architektura ESA-HAUV umożliwia ich zastosowanie również w infrastrukturze wodno-sanitarnej: w oczyszczalniach ścieków i kolektorach, gdzie napęd płetwowy zapewnia mobilność w środowisku silnie zanieczyszczonym, mulistym, porośniętym roślinnością i obciążonym biofilmem, w którym napędy śrubowe i wirniki odrzutowe ulegają zapychaniu, erozji oraz zakłóceniom pracy. W takich warunkach układy płetwowe

uzyskują wyraźną przewagę eksploatacyjną oraz funkcjonalną redundancję. Potrzeba takich systemów wynika z rosnącej złożoności i utrudnionego dostępu do obiektów hydrotechnicznych, które wymagają kosztownych i ryzykownych wejść personelu, oraz z konieczności ograniczenia zagrożeń dla ludzi.

2. Przegląd literatury przedmiotu

We wszelkich zastosowaniach maszyn konieczne jest zapewnienie skutecznych metod pozyskiwania energii elektrycznej do ich zasilania. Badania nad autonomicznymi systemami energetycznymi, materiałami funkcjonalnymi oraz technologiami pozyskiwania energii dla robotów podwodnych koncentrują się wokół następujących kluczowych obszarów: PV (Photovoltaics) – klasyczna fotowoltaika konwertująca światło na energię elektryczną, stosowana głównie w warunkach płytkowodnych lub przy oświetleniu sztucznym; PPV (Perovskite PV) – fotowoltaika perowskitowa o wysokiej sprawności przy słabym świetle i niskiej masie modułów; WPT (Wireless Power Transfer) – bezprzewodowy przesył energii metodami magnetycznymi, radiowymi lub optycznymi, umożliwiający ładowanie bez kontaktu; HYD (Hydrokinetics) – pozyskiwanie energii z ruchu wody, prądów, falowania i turbulencji; TENG (Triboelectric Nanogenerators) – generatory wykorzystujące tarcie i kontakt materiałów do produkcji energii z przepływów i drgań; PE (Piezoelectric Generators) – konwersja odkształceń mechanicznych na energię elektryczną, szczególnie efektywna przy drganiach i pracy napędu płetwowego; IND (Electromagnetic Induction) – wytwarzanie energii w zmiennych polach magnetycznych, także w układach wirujących; MS (Magnetostriktion) – generacja energii dzięki cyklicznym odkształceniom materiałów ferromagnetycznych w polu magnetycznym; PMAG (Piezomagnetism) – powstawanie polaryzacji magnetycznej pod wpływem naprężeń, umożliwiające konwersję energii w środowiskach o zmiennym ciśnieniu; TE (Thermoelectrics-Seebeck) – pozyskiwanie energii z naturalnych gradientów temperatury w wodzie; SSE (Spin Seebeck Effect) – generacja sygnału elektrycznego w ferromagnetykach pod wpływem gradientu temperatury; GAL (Galvanic Cells) – klasyczne ogniwa galwaniczne oparte na reakcjach elektrochemicznych; MFC (Microbial Fuel Cells) – bioogniwa mikrobiologiczne wykorzystujące metabolizm bakterii w wodach bogatych w materię organiczną; EK (Electrokinetics-Zeta) – energia z przepływu w mikrokanałach, powstająca wskutek przesuwania jonów przy ścianach kanału, zależna od pH, jonowości, materiału, temperatury i rodzaju cieczy; IBV (Isotopic Betavoltaics) – długowieczne źródła energii elektrycznej oparte na konwersji promieniowania beta w półprzewodniku. Obszary te stanowią podstawę projektowania systemów zdolnych do długotrwałej pracy w środowisku wodnym, szczególnie w zadaniach inspekcyjnych i serwisowych infrastruktury hydrotechnicznej oraz obiektów techniki sanitarnej. Coraz większe znaczenie zyskuje hydrodynamika napędów inspirowanych biologią: w pracy z 2026 r. [24] przedstawiono analizę zależności między geometrią płetwy, charakterystyką przepływu a efektywnością napędu w pływających robotach humanoidalnych pracujących w warunkach typowych dla obiektów hydrotechnicznych: napęd płetwowy wykazuje przewagę nad klasycznymi napędami mechanicznymi, zwłaszcza w środowiskach mulistych, zanieczyszczonych lub porośniętych roślinno-

ścią, gdzie śruby i wirniki szybko ulegają zapychaniu lub uszkodzeniom. Poniżej przedstawiono syntetyczny przegląd prac istotnych dla projektowania autonomicznych humanoidalnych robotów pływających ESA-HAUV, z uwzględnieniem wymagań energetycznych, materiałowych, hydrodynamicznych i środowiskowych istotnych dla budowli hydrotechnicznych.

Fotowoltaika i konwersja światła. Perowskitowe ogniwa słoneczne o strukturze ABX_3 (A – jon stabilizujący strukturę, B – jon metalu, X – anion halogenkowy) charakteryzują się wysoką sprawnością, niską masą i zdolnością pracy przy słabym oświetleniu; Correa-Baena (2017) [10] omawia stabilność perowskitów, Sadoqi (2026) [25] modeluje ich wydajność metodami ML (machine learning – uczenie maszynowe), a Cheng (2026) [9] analizuje warstwy transportu ładunku. Kayes (2011) [18] przedstawia rekordowe sprawności, a Aransiola (2026) [3] opisuje przejście do modułów użytkowych. Technologie te umożliwiają pozyskiwanie energii z oświetlenia sztucznego w obiektach hydrotechnicznych.

Piezoelektryka i odzysk energii z ruchu. Piezoelektryki to materiały, które podczas ugięcia, ściskania lub drgań generują krótki impuls elektryczny, dzięki czemu mogą odzyskiwać energię z ruchu konstrukcji; Wang & Song (2006) [36] wykazali, że nawet nanostruktury ZnO mogą pełnić rolę mikrogeneratorów, a Dagdeviren (2014) [11] potwierdza możliwość konwersji powtarzalnych drgań na użyteczny prąd. W ESA-HAUV piezoelektryki pozyskują energię z oscylacji płetw, drgań hydrodynamicznych i mikroruchów kadłuba, generując impulsy elektryczne gromadzone w układach zasilania pokładowego.

Triboelektryka i kontakt z wodą. Triboelektryka to zjawisko powstawania ładunków podczas kontaktu i rozdzielania powierzchni w układach „stałe-stałe” oraz „stałe-ciecz”; w środowisku wodnym decydują procesy powierzchniowe, takie jak odrywanie filmu wodnego, zmiany napięcia powierzchniowego i transfer ładunku na granicy faz. Wang (2013) [35] wykazał, że tribogeneratory mogą być lekkimi i czułymi źródłami energii. Tirpude (2026) [33] wykorzystał łuski ryb jako naturalny materiał triboelektryczny, generujący ładunek podczas zanurzenia i wynurzania. Mao (2026) [23], Hossain (2026) [17], Dey (2026) [13] i Tariq (2026) [31] opracowali wydajne nanokompozyty do pracy w wilgoci, a Fan (2012) [15] zaprezentował elastyczne tribogeneratory pozyskujące energię z ruchu, drgań i odrywania filmu wodnego na powierzchni robotów.

Termoelektryki i gradienty temperatur. Termoelektryki generują napięcie, gdy wzdłuż ich struktury występuje gradient temperatury, który wymusza rozdział ładunku w materiale. Podstawy działania opisali Snyder & Toberer (2008) [29] oraz Bell (2008) [5], a nowsze prace Liu (2024) [21] i Gong (2024) [16] przedstawiają materiały wysokosprawne, m.in. CNT (carbon nanotubes – węglowe nanorurki) i SnSe (selenek cyny), działające efektywnie nawet przy niewielkich gradientach. W ESA-HAUV termoelektryki wykorzystują naturalną różnicę temperatur między chłodną wodą a cieplejszą elektroniką, gdzie to właśnie gradient wzdłuż elementu termoelektrycznego umożliwia uporządkowany przepływ ładunku i generowanie energii elektrycznej.

Elektrochemia i magazynowanie energii. Elektrochemia opisuje przemianę energii chemicznej w elektryczną poprzez przepływ jonów między anodą i katodą w elektrolicie oraz elektronów w obwodzie zewnętrznym, co umożliwia kontrolowany transport ładunku i magazynowanie energii w ogniwach. Fun-

damenty współczesnej elektrochemii znajdujemy w pracach Bockris & Reddy (1970) [7] oraz Zhang (1996) [41], a nowsze prace Tavano (2026) [32], Subhanjaneyulu (2026) [30] i Deswal (2026) [12] opisują elektrody węglowe i tlenkowe o wysokiej stabilności cyklicznej, dużej powierzchni aktywnej i korzystnej wymianie jonowej. Materiały te umożliwiają wysokosprawne, kompaktowe magazynowanie energii.

Bioogniwa i systemy bioelektrochemiczne. Bioogniwa wytwarzają energię elektryczną dzięki temu, że mikroorganizmy lub enzymy rozkładają związki organiczne, uwalniając elektrony i jony. Elektrony trafiają na anodę, jony migrują przez elektrolit do katody, a różnica potencjałów między elektrodami generuje napięcie w obwodzie zewnętrznym. Jest to układ elektrochemiczny, w którym część biologiczna dostarcza substratów i inicjuje reakcje utleniania na anodzie, natomiast właściwa konwersja energii chemicznej w elektryczną zachodzi na elektrodach. Logan (2006) [22] opisał MFC – microbial fuel cells: bioogniwa mikrobiologiczne, Zebda (2013) [40] – bioogniwa glukozowe, a Efrati (2016) [14] – foto-bioelektrochemiczne konwersje energii. W systemach ESA-HAUV bioogniwa mogą wykorzystywać biofilm obecny w wodzie technicznej jako naturalne źródło związków organicznych i mikroorganizmów, umożliwiając długotrwałe, niskomocowe pozyskiwanie energii bez dodatkowych zasobów.

Hydrokinetyka i energia przepływu. Hydrokinetyka obejmuje techniki pozyskiwania energii z lokalnej prędkości przepływu wody, niezależnie od różnicy poziomów czy ciśnień, co odróżnia ją od klasycznej hydroenergetyki. Khan (2009) [19] i Bahaj (2011) [4] przedstawiają przegląd technologii konwersji energii przepływu, od turbin po rozwiązania mikroskalowe. W ESA-HAUV stosuje się mikrohydrokinetyczne generatory pracujące przy niskich prędkościach przepływu (0,05–0,3 m/s) i w ograniczonych przekrojach hydraulicznych, których zadaniem jest odzysk niewielkich ilości energii z lokalnych ruchów wody powstających podczas pracy robota. Przepływ wprawia w ruch miniaturowe wirniki, membrany lub elastyczne płetwy, a mikrogeneratory magnetyczne lub piezoelektryczne przetwarzają ten ruch na energię elektryczną (μW–mW), gromadzoną w układach buforowych i zasilającą sensory oraz moduły wybudzania. Istnieje teoretyczna możliwość zastosowania mikrogeneratorów ESA-HAUV jako pasywnego źródła energii w wybranych odcinkach kanałów, w których lokalne przepływy są stabilne, a poziom zanieczyszczeń nie powoduje trwałego zablokowania elementów roboczych.

Bezprzewodowy przesył energii (WPT) i betawoltaika izotopowa (IBV). Brown (1984) [8] i Shinohara (2014) [28] opisują podstawy WPT radiowego, Sample (2011) [26] rezonans magnetyczny, a Anyapo (2020) [2] i Yang (2026) [39] zastosowania podwodne. Zheng (2024) [42] omawia laserowy przesył energii. Agyekum (2025) [1] omawia technologie IBV (Isotopic Betavoltaics), wskazując, że betawoltaiczne źródła energii o gabarytach porównywalnych ze współczesnymi bateriami litowymi mogą generować stabilny prąd elektryczny przez dziesiątki lat, niezależnie od warunków środowiskowych (długowieczność energetyczna). WPT (Wireless Power Transfer) obejmuje metody indukcyjne, rezonansowe, radiowe i laserowe, które w odpowiednich warunkach środowiskowych mogą zapewniać bezkontaktowe ładowanie robotów ESA-HAUV na krótkich dystansach pod wodą.

3. Wprowadzenie do modelu komunikacji GNSS–akustyka w robotach ESA-HAUV

System sterowania ESA-HAUV w obrębie obiektów hydrotechnicznych wykorzystuje hybrydową komunikację GNSS–akustyka (GNSS: Global Navigation Satellite System – globalny system nawigacji satelitarnej), zapewniając wymianę danych między robotem a infrastrukturą nadwodną w warunkach ograniczonej widoczności i zmiennych parametrów środowiskowych. Boja GNSS pełni funkcję węzła synchronizacyjnego: odbiera sygnały satelitarne, generuje czas odniesienia i przekazuje pakiety sterujące do infrastruktury podwodnej; boja GNSS stanowi element infrastruktury hydrotechnicznej, pracujący na powierzchni wody i połączony ze stacją emiterów akustycznych; robot ESA-HAUV nie wypuszcza boi, lecz korzysta z jej sygnałów synchronizacyjnych i korekcyjnych. Stacjonarne emitery akustyczne przekształcają te pakiety w modulowane fale akustyczne dostosowane do propagacji w wodzie, umożliwiając komunikację w przestrzeniach zamkniętych, gdzie sygnały GNSS i łączność radiowa z zewnątrz są silnie tłumione. Robot, wyposażony w hydrofony i układ dekodowania, odbiera sygnały sterujące i synchronizacyjne, integrując je z warstwą decyzyjną. Dobór częstotliwości akustycznej zależy od geometrii obiektu, odległości propagacji oraz dopuszczalnych strat transmisyjnych. W kolejnym podrozdziale przedstawiono model uzasadniający wybór pasma roboczego, natomiast w tabelach 1 i 2 zestawiono źródła energii oraz współczesne technologie generowania prądu elektrycznego.

Tabela 1. Charakterystyka źródeł energii stosowanych w autonomicznych robotach podwodnych typu ESA-HAUV (opracowanie własne)
Table 1. Characteristics of energy sources used in ESA-HAUV autonomous underwater robots (own study)

Źródło energii	Typowa moc	Kiedy działa	Rola w ESA-HAUV	Opis
PV perowskitowe – Perovskite Photovoltaics	setki mW → waty	światło: sztuczne lub laserowe	główne źródło	Wysokosprawne, lekkie ogniwa przy słabym oświetleniu.
WPT (Wireless Power Transfer) – laserowe, indukcyjne, rezonansowe, radiowe, ultradźwiękowe, IR	waty → dziesiątki watów	dokowanie lub linia widzenia wiązki	szybkie ładowanie	Bezprzewodowy przesył energii: indukcyjny lub laserowy.
HKG (HydroKinetic Generation) – Hydrokinetyka	dziesiątki mW → waty	przepływ wody	uzupełniające	Energia z lokalnego przepływu (mikroturbiny, elastyczne elementy).
TENG (Triboelectric Nanogenerators) – Triboelektryki	μW → mW	ruch wody / tarcie	uzupełniające	Ładunek z kontaktu i rozdzielania powierzchni w wodzie.
PEG (PiezoElectric Generators) – Piezoelektryki	μW → mW	drgania / ruch robota	uzupełniające, pasywne	Energia z odkształceń i drgań konstrukcji.
MFC (Microbial Fuel Cells) – Bioogniwa	μW → mW	biofilm / związki organiczne	długotrwałe, niskomocowe	Energia z utleniania związków organicznych przez mikroorganizmy.
IBV (Isotopic Betavoltaics) – Izotopowe betawoltaiki	μW → mW (stabilne dekady)	ciągła emisja β	rezerwowe, ultradługowieczne	Stała energia z konwersji cząstek β w półprzewodniku.

Tabela 2. Zestawienie łączone 15 źródeł energii (moc–masa–sprawność–środowisko); opracowanie własne**Table 2.** Combined overview of 15 energy sources (power–mass–efficiency–operating environment); own study

Źródło	Moc typowa	Masa	Sprawność	Środowisko pracy
PV – Photovoltaics (fotowoltaika klasyczna)	mW – W	niska	10–25%	światło 450 nm, lasery
PPV – Perovskite PV (fotowoltaika perowskitowa)	mW – W	bardzo niska	15–30%	światło słabe, rozproszone
WPT – Wireless Power Transfer (beprzewodowy przesył energii)	W – 10-W	średnia	50–90%	dokowanie, linia „wzidzenia”
HYD – Hydrokinetics (hydrokinetyka)	mW – W	średnia	30–70%	przepływ wody, prądy
TENG – Triboelectric Nanogenerators (triboelektryki)	μW – mW	bardzo niska	5–30%	tarcie, ruch wody
PE – Piezoelectric Generators (generatory piezoelektryczne)	μW – mW	bardzo niska	10–40%	drżania, turbulencje
IND – Electromagnetic Induction (indukcja elektromagnetyczna)	μW – mW	niska–średnia	20–80%	ruch, drżania, zmienne pola magnetyczne jako warunek indukcji
MS – Magnetostriction (magnetostrykcja)	μW – mW	niska	5–20%	drżania, zmienne pola magnetyczne jako warunek powstania drgań magnetostrykcyjnych
PMAG – Piezomagnetism (piezomagnetyzm)	μW – mW	niska	5–15%	drżania, kompozyty magnetyczne
TE – Thermoelectrics (Seebeck) (termoelektryki)	μW – mW	niska	3–8%	gradienty temperatury wzdłuż materiału
SSE – Spin Seebeck Effect (efekt spinowoSeebecka)	nW – μW	bardzo niska	<1%	nanostruktury, gradienty termiczne
GAL – Galvanic Cells (ogniwa galwaniczne)	mW – W	średnia	80–95%	szeroki zakres środowisk
MFC – Microbial Fuel Cells (bioogniwa mikrobiologiczne)	μW – mW	średnia	10–60%	muł, osady, biofilmy
EK – Electrokinetics (Zeta) (elektrokinetyka – potencjał zeta)	μW – mW	bardzo niska	20–50%	przepływ wody, mikrokanaly
IBV – Isotopic Beta-voltaics (betawoltaika izotopowa)	μW – mW	niska	5–20%	wszędzie, 24/7, dekady

4. Pasma niskiej absorpcji promieniowania w wodzie

Woda, mimo swojej optycznej przezroczystości, jest jednym z najsilniejszych naturalnych absorberów energii elektromagnetycznej. W kontekście przesyłu energii do odbiorników stanowi to istotne ograniczenie: większość długości fal – od promieniowania rentgenowskiego po daleką podczerwień – jest w wodzie tłumiona o wiele rzędów wielkości silniej niż w powietrzu. Jedynie wąskie pasmowe obszary podwyższonej transmisji, takie jak pasmo niebiesko-zielone (~450 nm) oraz bliska podczerwień (~808 nm), umożliwiają efektywny przesył sygnału lub mocy w środowisku wodnym (do około 50 m w wodzie czy-

stej). Ta sama właściwość, która ogranicza technologie optyczne, pełni jednak kluczową funkcję ochronną: wysoka absorpcja H₂O sprawia, że woda skutecznie pochłania promieniowanie wysokoenergetyczne – kosmiczne, gamma i rentgenowskie – redukując jego intensywność już w pierwszych centymetrach głębokości. Dzięki temu woda stanowi naturalną barierę radiacyjną, od miliardów lat chroniąc biosferę przed destrukcyjną energią docierającą z przestrzeni kosmicznej. W środowisku wodnym większość metod bezprzewodowego przesyłu energii działa wyłącznie na bardzo krótkich dystansach, praktycznie kontaktowych. Indukcja magnetyczna i rezonans wymagają bliskiego sprzężenia cewek, które w wodzie zanika już po kilku centymetrach. Podobnie ultradźwiękowe WPT oraz promieniowanie IR (Infrared – podczerwień) i UV (Ultraviolet – nadfiolet) są tłumione o wiele rzędów wielkości silniej niż w powietrzu, co ogranicza ich zasięg do strefy „dotyku”. W praktyce jedynymi niekontaktowymi metodami pozostają trzy pasma transmisyjne w wodzie: pasmo niebiesko-zielone (~450 nm), bliska podczerwień (808 nm) oraz ekstremalnie długie fale radiowe (VLF/LF: VLF – Very Low Frequency: 3–30 kHz; LF – Low Frequency: 30–300 kHz). W celu uporządkowania i jednoznacznego przedstawienia różnic pomiędzy poszczególnymi klasami robotów podwodnych zastosowano trójstopniową strukturę porównawczą. Tabela 3 obejmuje cechy konstrukcyjne, określające fizyczną budowę i możliwości ruchowe robotów. Tabela 4 prezentuje cechy funkcjonalne, związane z energetyką, poziomem autonomii oraz zakresem zastosowań operacyjnych. Tabela 5 zestawia cechy systemowe, opisujące sposób realizacji misji, czas działania, interakcję z człowiekiem oraz poziom organizacji systemowej. Razem tworzą one spójny obraz ewolucji technologicznej – od klasycznych ROV po energetycznie samowystarczalne jednostki ESA-HAUV.

Tabela 3. Cechy konstrukcyjne robotów podwodnych danej klasy; opracowanie własne**Table 3.** Structural Characteristics of Underwater Robots by Class; own study

Klasa robota	Charakterystyka	Mobilność	Manipulacja
ROV	Zdalnie sterowany	Napęd śrubowy	Ramiona opcjonalnie / kamera
AUV	Autonomiczny	Napęd śrubowy, pędnik strumieniowy	Chwytnak / kamera
HAUV	Autonomiczny	Napęd hybrydowy; zasilanie: indukcyjne i PV	Manipulator / kamera
ESAHAUV	Samowystarczalny humanoidalny; praca zwłaszcza w grupie	Napęd pletnowy; zasilanie łączne: PV, WPT, HKG, TENG, PEG, MFC, IBV, MS, PMAG, TE, SSE, GAL, EK	Manipulatory humanoidalne: duża liczba stopni swobody; czujniki siły i momentu; precyzyjna kontrola chwytu; obsługa narzędzi podwodnych; autonomiczne procedury serwisowe AI

Tabela 4. Cechy funkcjonalne zależne od klasy robota podwodnego; opracowanie własne
Table 4. Functional Characteristics Dependent on the Class of Underwater Robot; own study

Klasa robota	Energetyka	Autonomia	Zastosowanie operacyjne
ROV	kabel	niska	inspekcje punktowe, prace pod nadzorem operatora
AUV	bateria	średnia	mapowanie, pomiary, misje liniowe bez manipulacji
HAUV	bateria + indukcja + PV	średnia	inspekcje, proste manipulacje
ESAHAUV	hybrydowy system: PV, WPT, HKG, TENG, PEG, MFC, IBV, MS, PMAG, TE, SSE, GAL, EK	bardzo wysoka	długotrwałe misje autonomiczne, naprawy, ratowanie innych robotów

Tabela 5. Cechy systemowe robotów podwodnych; opracowanie własne
Table 5. System-Level Characteristics of Underwater Robots; own study

Klasa robota	Tryb misji	Czas działania	Interakcja z człowiekiem	Poziom organizacji systemowej
ROV	Misje punktowe, w czasie rzeczywistym	Minuty–godziny	Wysoka – operator steruje	Brak organizacji systemowej
AUV	Misje liniowe, zaprogramowane	Godziny	Podstawowa – konfiguracja	Jednostka oprogramowana
HAUV	Misje zaprogramowane	Godziny	Wysoka – nadzór okresowy	Jednostka częściowo autonomiczna
ESA-HAUV	Misje długotrwałe, kolektywne	Dni–tygodnie	Minimalna – interwencja awaryjna	Kolektyw z zachowaniami emergentnymi: AI

5. Model matematyczny strat transmisyjnych i dobór pasma akustycznego dla systemu sterowania robotami typu ESA-HAUV

Sterowanie robotem systemu ESA-HAUV w obiektach hydrotechnicznych opiera się na dwóch komplementarnych kanałach komunikacyjnych:

Kanał satelitarny – boje GNSS. Boja GNSS jest powierzchniową, wyporną platformą pomiarową wyposażoną w odbiornik GNSS oraz moduł komunikacyjny, połączoną przewodem energetyczno-komunikacyjnym ze stacją emiterów akustycznych. Pełni

funkcję stacjonarnego punktu referencyjnego i nadrzędnego węzła synchronizacji, dostarczając sygnał czasu oraz korekcie GNSS do infrastruktury akustycznej. W konfiguracji minimalnej stosuje się dwie boje GNSS, co umożliwia wyznaczenie kierunku odniesienia i transformację lokalnego układu akustycznego do globalnego układu GNSS. Robot ESA-HAUV może posiadać odbiornik GNSS (rover), lecz sygnał satelitarny jest dostępny wyłącznie na powierzchni; pod wodą jedynym odniesieniem pozostaje układ boi GNSS oraz emiterzy akustyczne.

Kanał lokalny – infrastruktura akustyczna. Lokalna infrastruktura akustyczna obejmuje stacjonarne emiterzy akustyczne („podwodne głośniki”) rozmieszczone na ścianach i elementach konstrukcyjnych obiektu hydrotechnicznego. Emiterzy te pełnią funkcję podwodnych radiolatarni, zapewniając stabilną komunikację i pozycjonowanie w środowisku, w którym fale radiowe nie mogą być stosowane.

Aby zapewnić stabilną komunikację, konieczne jest określenie maksymalnej częstotliwości sygnału akustycznego, która może być stosowana przy danej odległości propagacji w podwodnych emiterach akustycznych. W tym celu wykorzystuje się uproszczony model strat transmisyjnych [42–44]:

$$TL(f, R) = 20 \log_{10} R + \alpha(f) R \tag{1}$$

- gdzie:
- R – odległość propagacji sygnału, m
 - f – częstotliwość sygnału, kHz
 - TL – strata transmisyjna (Transmission Loss), dB
 - $\alpha(f)$ – współczynnik tłumienia absorpcyjnego, dB/m

W wodzie technicznej, dla częstotliwości rzędu kilku-kilkuset kHz, stosuje się liniową aproksymację:

$$\alpha(f) \approx kf \tag{2}$$

- gdzie:
- k – zależy od jakości wody (typowo $k = 0,001 \div 0,003 \text{ dB/m}\cdot\text{kHz}$)
- Po podstawieniu otrzymujemy:

$$TL(f, R) = 20 \log_{10} R + kf R \tag{3}$$

Bilans energetyczny łączą akustycznego można oszacować następująco: przyjmujemy poziom nadawczy P_{tx} [dB re 1 μPa] oraz minimalny poziom odbioru P_{min} [dB re 1 μPa], gdzie notacja „re 1 μPa ” oznacza odniesienie do ciśnienia akustycznego 1 mikroPaskala – standardowej jednostki referencyjnej w akustyce podwodnej. Maksymalna dopuszczalna strata transmisyjna: $TL_{max} = P_{tx} - P_{min}$ natomiast warunek użyteczności pasma $TL(f, R) \leq TL_{max}$.

Jako przykład liczbowy dla odległości 30 m możemy przyjąć następujące założenia: $R = 30 \text{ m}$; $P_{tx} = 180 \text{ dB re } 1 \mu\text{Pa}$, $P_{min} = 120 \text{ dB re } 1 \mu\text{Pa}$, $TL_{max} = 60 \text{ dB}$, $k = 0,002 \text{ dB/m}\cdot\text{kHz}$. Wówczas: $20\log_{10} 30 = 29,54 \text{ dB}$, natomiast z warunku: $29,54 + 0,002\cdot f\cdot 30 \leq 60$ otrzymujemy $f_{max} \approx 508 \text{ kHz}$. Z kolei dla odległości 100 m otrzymujemy: $20\log_{10} 100 = 40 \text{ dB}$, przy warunku: $40 + 0,002\cdot f\cdot 100 \leq 60$ otrzymujemy $f_{max} \approx 100 \text{ kHz}$.

Z powyższych obliczeń można wyciągnąć następujące wnioski: przy trzykrotnym zwiększeniu odległości (z 30 m do 100 m) górna granica użytecznego pasma spada około pięciokrotnie.

6. Mechanizm powrotu robota przy braku zasięgu nawigacyjnego

Nawigacja inercyjna INS (Inertial Navigation System – system nawigacji inercyjnej) umożliwia robotowi autonomiczną pracę poza zasięgiem emiterów akustycznych, ponieważ nie wymaga sygnałów zewnętrznych, nie korzysta z GNSS i działa w pełnej ciszy elektromagnetycznej. INS opiera się wyłącznie na pomiarach akcelerometrów, żyroskopów oraz jednostki IMU (Inertial Measurement Unit – inercyjna jednostka pomiarowa). INS integruje przyspieszenia do prędkości, a prędkość do pozycji, co pozwala robotowi kontynuować misję nawet w całkowitym braku łączności. Z czasem pojawia się jednak narastający dryf błędów, który wymaga okresowej korekty.

Aby zapobiec utracie pozycji absolutnej, robot ESA-HAUV stosuje mechanizm autonomicznego powrotu do zasięgu nawigacyjnego, oparty na trzech zasadach:

Detekcja zaniku sygnału – robot monitoruje poziom odbieranych sygnałów akustycznych, analizując RSSI (Received Signal Strength Indicator – wskaźnik mocy sygnału odebranego) oraz SNR (Signal-to-Noise Ratio – stosunek sygnału do szumu). Gdy wartości te spadają poniżej progu operacyjnego, system przełącza się w tryb powrotu.

Powrót po trajektorii INS – robot wykorzystuje ostatnią poprawną pozycję akustyczną oraz wektor ruchu wyznaczony przez INS, aby obliczyć kierunek powrotu do obszaru, w którym sygnały były stabilne.

Reaktywizacja sygnału – po wejściu w strefę zasięgu robot automatycznie przeprowadza synchronizację z emiterami akustycznymi, koryguje dryf INS i wraca do trybu normalnej pracy. Mechanizm ten zapewnia, że robot nie oddali się na tyle, aby utracić możliwość rekonstrukcji pozycji absolutnej, a jednocześnie może bezpiecznie operować w obszarach o złożonej geometrii, gdzie sygnały akustyczne ulegają chwilowym zanikom. Aby ograniczyć narastający dryf INS, robot może wykorzystywać dopplerowski log prędkości (DVL, Doppler Velocity Log), który mierzy prędkość względem dna na podstawie przesunięcia dopplerowskiego odbitych sygnałów akustycznych. Integracja danych DVL z INS pozwala na bieżącą korektę trajektorii i stabilizację pozycji w warunkach braku łączności.

7. Wnioski

W środowisku wodnym istnieją tylko trzy pasma o niskiej absorpcji: niebiesko-zielone (~430–490 nm), bliska podczerwień (808 nm) oraz ekstremalnie długie fale radiowe VLF/LF. To one wyznaczają granice możliwej komunikacji i determinują architekturę systemów sterowania.

W praktyce hydrotechnicznej użyteczne pasma akustyczne obejmują: 5–30 kHz – komunikacja ogólna i sygnały sterujące z boi GNSS, 30–100 kHz – łączność średniego zasięgu z emiterami ściennymi, 100–500 kHz – krótkie dystanse: dokowanie, precyzyjne pozycjonowanie, linki serwisowe.

Model komunikacji ESA-HAUV łączy akustykę (kHz) z optycznymi oknami transmisyjnymi (450 nm, 808 nm), wykorzystując jedyne dostępne „wyspy niskiego tłumienia”. System dobiera częstotliwość adaptacyjnie – zależnie od geometrii obiektu, odległo-

ści, szumu tła i wymagań misji.

Boja GNSS pełni funkcję kanału nadrzędnego (synchronizacja, sterowanie), natomiast emiterzy akustyczne zapewniają lokalną komunikację o wysokiej przepływności.

Zakres kHz stanowi optymalne medium transmisyjne w wodzie: zapewnia kompromis między zasięgiem, tłumieniem i przepustowością. Fale 5–500 kHz propagują się stabilnie na dystansach od kilku do kilkuset metrów, podczas gdy pasmo 200–2000 Hz – mimo niskiego tłumienia – jest bezużyteczne z powodu hałasu/szumu, niskiej przepustowości i braku kierunkowości.

Dlatego system ESA-HAUV wykorzystuje pasma 5–500 kHz, które gwarantują stabilną komunikację, precyzyjne sterowanie i możliwość pracy w czasie rzeczywistym w złożonych obiektach hydrotechnicznych.

8. Podziękowania

Pracę tę dedykuję Mojemu Przyjacielowi – Ukochanej Jolancie, której troska, empatia i wrażliwość na piękno były dla mnie drogowskazem i spokojem serca, zwłaszcza w chwilach matematycznych emocji, gdy fraktale Barnsleya spletały się z algorytmami humanoidalnych robotów podwodnych, tworząc własną, nieoczywistą symfonię. Jej obecność – cicha, dobra i pełna światła – była jak delikatny motyw przewodni, który powraca, by nadać sens nawet najbardziej zawiłym równaniom. To dzięki temu motywowi nawet najbardziej złożone struktury mogą brzmieć harmonijnie, jeśli towarzyszy im dobro.

9. Literatura

- [1] Agyekum, E.B. (2025). Beta-Voltaic Nuclear Batteries – Review of Recent Developments, Challenges and Future Research Directions. *Journal of Energy Storage* 122 /2025: 116701. <https://doi.org/10.1016/j.est.2025.116701>
- [2] Anyapo C., P. Intani. (2020). Wireless Power Transfer for Autonomous Underwater Vehicle, 2020 IEEE PELS Workshop on Emerging Technologies: Wireless Power Transfer (WoW), Seoul, Korea (South), 2020, pp. 246-249, <https://doi.org/10.1109/WoW47795.2020.9291324>
- [3] Aransiola, A. O., Udofia, K. I., Amakom, C., Jubu, P. R., Nwokolo, I. K., Anyanwu, J. O., Ilori, O. O., & Oguzie, E. E. (2026). From record efficiency to commercially viable modules: A commercialization framework for stability-driven translation of perovskite solar cells. *Next Research.*, 10, 101856. <https://doi.org/10.1016/j.nexres.2026.101856>
- [4] Bahaj, A. S. (2011). Generating Electricity from the Oceans. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 15 (7): 3399–3416. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2011.04.032>
- [5] Bell, Lon E. (2008). Cooling, Heating, Generating Power, and Recovering Waste Heat with Thermoelectric Systems. *Science* 321, no. 5895/2008: 1457–1461. <https://doi.org/10.1126/science.1158899>
- [6] Bockris, John O'M., and Amulya K. N. Reddy. (1970). *Modern Electrochemistry*. Vol. 2: Electrochemistry in Transition. New York: Plenum Press, 1970.
- [7] Bockris, John O'M., and Amulya K. N. Reddy. (1970). *Modern Electrochemistry*. Vol. 1: An Introduction to an Interdisciplinary Area. New York: Plenum Press, 1970.
- [8] Brown W.C. (1984). The History of Power Transmission by Radio Waves. *IEEE Transactions on Microwave Theory and*

- Techniques*, vol. 32, no. 9, pp. 1230-1242, September 1984, <https://doi.org/10.1109/TMTT.1984.1132833>
- [9] Cheng, X., J. Li, Y. Li, and P. Niu. (2026). Development of Hole-Transport Layers in Inverted Perovskite Solar Cells. *Solar Energy Materials and Solar Cells* 299: 114214. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2026.114214>
- [10] Correa-Baena, J.-P., M. Saliba, T. Buonassisi, M. Grätzel, A. Abate, W. Tress, and A. Hagfeldt. (2017). Promises and Challenges of Perovskite Solar Cells. *Science* 358 (6364): 739–744. <https://doi.org/10.1126/science.aam6323>
- [11] Dagdeviren, C., Yang, B. D., Su, Y., Tran, P. L., Joe, P., Anderson, E., Xia, J., Doraiswamy, V., Dehdashti, B., Feng, X., Lu, B., Poston, R., Khalpey, Z., Ghaffari, R., Huang, Y., Slepian, M. J., & Rogers, J. A. (2014). Conformal piezoelectric energy harvesting and storage from motions of the heart, lung, and diaphragm. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 111(5), 1927–1932. <https://doi.org/10.1073/pnas.1317233111>
- [12] Deswal, I., Manyani, N., Kumar, A., & Tripathi, S. K. (2026). Tailoring the structure and electrochemical properties of CuO via Manganese doping for supercapacitor applications. *Ionics*, 32(7), 7033–7055. <https://doi.org/10.1007/s11581-026-07192-w>
- [13] Dey, P. K., & Bhattacharyya, A. R. (2026). High Performance Triboelectric Nanogenerators of Reduced Graphene Oxide-Based Poly(vinyl alcohol) Nanocomposites toward Bio-mechanical Energy Harvesting and an IoT System for Human–Machine Interface Application. *ACS Applied Electronic Materials*, 8(4), 1547–1563. <https://doi.org/10.1021/acsaelm.5c01968>
- [14] Efrati, A., Lu, C., Michaeli, D., Nechushtai, R., Alsaoub, S., Schuhmann, W., & Willner, I. (2016). Assembly of photo-bioelectrochemical cells using photosystem I-functionalized electrodes. *Nature Energy*, 1(2). <https://doi.org/10.1038/nenergy.2015.21>
- [15] Fan, F., Tian, Z., & Wang, Z. L. (2012). Flexible triboelectric generator. *Nano Energy*, 1(2), 328–334. <https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2012.01.004>
- [16] Gong, Y., Dou, W., Lu, B., Zhang, X., Zhu, H., Ying, P., Zhang, Q., Liu, Y., Li, Y., Huang, X., Iqbal, M. F., Zhang, S., Li, D., Zhang, Y., Wu, H., & Tang, G. (2024). Divacancy and resonance level enables high thermoelectric performance in n-type SnSe polycrystals. *Nature Communications*, 15(1), 4231. <https://doi.org/10.1038/s41467-024-48635-0>
- [17] Hossain, M. A., Rahman, M. W., Padilla, V., & Uddin, M. J. (2026). A High-Performance triboelectric nanogenerator incorporating Solid-State synthesized ZNTIO 3 nanoparticles. *ACS Applied Electronic Materials*, 8(7), 2882–2900. <https://doi.org/10.1021/acsaelm.5c02649>
- [18] Kayes, B. M., Nie, H., Twist, R., Spruytte, S. G., Reinhardt, F., Kizilyalli, I. C., & Higashi, G. S. (2011, June). 27.6% conversion efficiency, a new record for single-junction solar cells under 1 sun illumination. In 2011 37th IEEE photovoltaic specialists conference (pp. 000004-000008). IEEE. <https://doi.org/10.1109/PVSC.2011.6185831>
- [19] Khan, M., Bhuyan, G., Iqbal, M., & Quaiacoe, J. (2009). Hydrokinetic energy conversion systems and assessment of horizontal and vertical axis turbines for river and tidal applications: A technology status review. *Applied Energy*, 86(10), 1823–1835. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2009.02.017>
- [20] Larminie, J., A. Dicks. (2003). Fuel Cell Systems Explained. Chichester: John Wiley & Sons, 2003. <https://doi.org/10.1002/9781118878330>
- [21] Liu, Y., Shi, X., Wu, T., Wu, H., Mao, Y., Cao, T., Wang, D., Liu, W., Li, M., Liu, Q., & Chen, Z. (2024). Boosting thermoelectric performance of single-walled carbon nanotubes-based films through rational triple treatments. *Nature Communications*, 15(1), 3426. <https://doi.org/10.1038/s41467-024-47417-y>
- [22] Logan, B. E., Hamelers, B., Rozendal, R., Schröder, U., Keller, J., Freguia, S., Aelterman, P., Verstraete, W., & Rabaey, K. (2006). Microbial Fuel Cells: Methodology and technology. *Environmental Science & Technology*, 40(17), 5181–5192. <https://doi.org/10.1021/es0605016>
- [23] Mao, M., Zhao, Q., Tao, J., Mu, Q., He, X., & Li, J. (2026). Humidity-Adaptive triboelectric Contact/Noncontact sensing and energy harvesting enabled by Plant-Ash- and Ammonium-Salt-Coengineered cellulose Aerogel. *ACS Sensors*, 11(5), 3628–3642. <https://doi.org/10.1021/acssensors.5c03018>
- [24] Paleczek W. (2026). Hydrodynamika pływających robotów humanoidalnych dla budownictwa hydrotechnicznego i techniki sanitarnej [Fin Hydrodynamics in the Design of Swimming Humanoid Robots for Hydraulic Engineering and Sanitary Technology]. *Gaz, Woda i Technika Sanitarna*, 100(1): 18–25. <https://doi.org/10.65545/GWITS.2026.01.04>
- [25] Sadouqi, A., Chargui, T., Idrissi, R. E., & Lmai, F. (2026). Numerical validation and machine learning-based modeling of energy conversion efficiency in Cs₂AgBi_{0.75}Sb_{0.25}Br₆ double perovskite solar cells. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 302, 114330. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2026.114330>
- [26] Sample A. P., D. T. Meyer and J. R. Smith. (2011). Analysis, Experimental Results, and Range Adaptation of Magnetically Coupled Resonators for Wireless Power Transfer. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 58, no. 2, pp. 544-554, Feb. 2011, <https://doi.org/10.1109/TIE.2010.2046002>
- [27] Sheng, M., Yang, Y., Bin, X., Zhao, S., Pan, C., Nawaz, F., & Que, W. (2021). Recent advanced self-propelling salt-blocking technologies for passive solar-driven interfacial evaporation desalination systems. *Nano Energy*, 89, 106468. <https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2021.106468>
- [28] Shinohara N. (2014). Wireless Power Transfer via Radio-waves. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, 2014. <https://doi.org/10.1002/9781118863008>
- [29] Snyder, G., Toberer, E. (2008). Complex thermoelectric materials. *Nature Mater* 7/2008, 105–114. <https://doi.org/10.1038/nmat2090>
- [30] Subhanjaneyulu, P. V., Sahu, S. K., Kumar, C., Gotte, M. P., & Sreekanth, P. S. R. (2026). Electrolyte–surface synergy in biomass-derived carbon electrodes for supercapacitors. *Journal of Materials Science*, 61(28), 20041–20076. <https://doi.org/10.1007/s10853-026-12964-w>
- [31] Tariq, M. Z., Lee, B., Choi, D., & Park, S. J. (2026). Triboelectric enhancement in Droplet-Based electricity generators via Nafion-Functionalized cellulose nanocrystals. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 18(6), 10363–10371. <https://doi.org/10.1021/acsaami.5c23895>
- [32] Tavano, R., Randall, J. D., Thao, N. N. L., Creighton, C., Xu, J., Henderson, L. C., & Asp, L. E. (2026). Partially carbonised carbon fibres as improved electrodes for structural battery applications. *Communications Materials*, 7(1). <https://doi.org/10.1038/s43246-026-01194-x>

- [33] Tirpude, M. P., Tayade, N. T., Khan, M. N. A., Tiwari, R. S., Singh, V. V., Hussain, A. a. M., Dhangada, P. J., & Prabhu-karwatkar, P. A. (2026). Indian salmon fish-scales based novel triboelectric nanogenerators and its enhanced performance. *Sensors and Actuators a Physical*, 408, 117980. <https://doi.org/10.1016/j.sna.2026.117980>
- [34] Vinayagam, K., Saravanan, N., & Sundaramurthy, A. (2026). Fabrication of aluminium modified Bi2O3 thin film as a transparent conductive oxide for optoelectronic applications. *Discover Surfaces*, 1(1). <https://doi.org/10.1007/s44507-026-00003-9>
- [35] Wang, Z. L. (2013). Triboelectric nanogenerators as new energy technology for Self-Powered systems and as active mechanical and chemical sensors. *ACS Nano*, 7(11), 9533–9557. <https://doi.org/10.1021/nn404614z>
- [36] Wang, Z. L., & Song, J. (2006). Piezoelectric nanogenerators based on Zinc oxide nanowire arrays. *Science*, 312(5771), 242–246. <https://doi.org/10.1126/science.1124005>
- [37] Wu, Y., Zhang, T., Zhang, F., Wang, Y., Ma, Y., Huang, Y., Liu, Y., & Chen, Y. (2012). In situ synthesis of graphene/single-walled carbon nanotube hybrid material by arc-discharge and its application in supercapacitors. *Nano Energy*, 1(6), 820–827. <https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2012.07.001>
- [38] Xu, D., W. Hu, X. N. Sun, P. Cui, and X. Y. Chen. (2017). Redox Additives of Na₂MoO₄ and KI: Synergistic Effect and the Improved Capacitive Performances for Carbon-Based Supercapacitors. *Journal of Power Sources* 341: 448–456. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2016.12.031>
- [39] Yang, L. (2026). A Review of Underwater Inductive Wireless Power Transfer and Capacitive Wireless Power Transfer System. In: *Undersea Power Conversion and Wireless Power Transfer Technology*. Smart Energy Systems. Springer, Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-95-7222-9_2
- [40] Zebda, A., Cosnier, S., Alcaraz, J., Holzinger, M., Goff, A. L., Gondran, C., Boucher, F., Giroud, F., Gorgy, K., Lamraoui, H., & Cinquin, P. (2013). Single glucose biofuel cells implanted in rats power electronic devices. *Scientific Reports*, 3(1), 1516. <https://doi.org/10.1038/srep01516>
- [41] Zhang, X.G. (1996). Electrochemistry of Zinc Oxide. In: *Corrosion and Electrochemistry of Zinc*. Springer, Boston, MA. https://doi.org/10.1007/978-1-4757-9877-7_4
- [42] Zheng, Y., Zhang, G., Huan, Z., Zhang, Y., Yuan, G., Li, Q., Ding, G., Lv, Z., Ni, W., Shao, Y., Liu, X., & Zu, J. (2024). Wireless laser power transmission: Recent progress and future challenges. *Space Solar Power and Wireless Transmission*, 1(1), 17–26. <https://doi.org/10.1016/j.sspwt.2023.12.001>
- [43] Ziomek, L. (1985). Underwater acoustics: a linear systems theory approach. Elsevier.
- [44] Ziomek, L. (2020). *Fundamentals of acoustic field theory and space-time signal processing*. CRC Press.
- [45] Ziomek, L. (2022). *An Introduction to Sonar Systems Engineering*. CRC Press.
- [46] Zopf, D. A., Hollister, S. J., Nelson, M. E., Ohye, R. G., & Green, G. E. (2013). Bioresorbable Airway Splint Created with a Three-Dimensional Printer. *New England Journal of Medicine*, 368(21), 2043–2045. <https://doi.org/10.1056/nejmc1206319>



Rok założenia 1919

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

zaprasza na

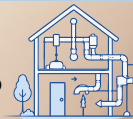
**XIX OGÓLNOPOLSKĄ KONFERENCJĘ NAUKOWO-TECHNICZNĄ
"WENTYLACJA • KLIMATYZACJA • OGRZEWNICTWO • ŚRODOWISKO"**

**I. CIEPŁOWNICTWO I OGRZEWNICTWO – DROGA DO DEKARBONIZACJI**

1. Systemy IV i V generacji
2. Wielkoskalowe pompy ciepła
3. Efektywność energetyczna budynków
4. Hybrydowe węzły ciepłne
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/>

Zostań członkiem Polskiego Zrzeszenia Inżynierów i Techników Sanitarnych



POLSKIE ZRZESZENIE
INŻYNIERÓW I TECHNIKÓW
SANITARNYCH

Członkostwo w PZITS umożliwia:



Otrzymywanie:

- zaproszeń na seminaria, konferencje i szkolenia, organizowane przez PZITS,
- zaproszeń do udziału w wycieczkach technicznych i spotkaniach integracyjnych,
- informacji o zmianach w przepisach i legislacji branżowej,
- odznaczeń honorowych PZITS,
- ofert pracy w branży.

Możliwość:

- udziału w opracowywaniu przepisów oraz zgłaszania propozycji zmian w obowiązujących regulacjach,
- nawiązywania bezpośrednich kontaktów z ekspertami i przedstawicielami branży,
- uzyskiwania porad i opinii w sprawach technicznych związanych z zakresem działalności PZITS,
- kontaktu z przedstawicielami organizacji zrzeszonych w REHVA i IGU oraz wymiany informacji na poziomie międzynarodowym,
- publikowania artykułów w czasopismach PZITS,
- aktywnego udziału w pracach sekcji branżowych.



Dostęp do:

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

Kim jesteśmy?

PZITS to ogólnopolska organizacja skupiająca ok. 3 200 techników, inżynierów i naukowców działających w obszarze inżynierii sanitarnej i środowiska.

Misją PZITS jest działalność na rzecz społeczeństwa poprzez rozwój rozwiązań technicznych służących ochronie zdrowia i środowiska naturalnego.

PZITS jest jedynym polskim członkiem REHVA oraz International Gas Union, co umożliwia aktywną współpracę międzynarodową.

Członkowie PZITS uczestniczą w pracach zespołów opiniujących prawo budowlane i przepisy techniczno-budowlane oraz działają w Organach Technicznych Polskiego Komitetu Normalizacyjnego.



Więcej szczegółów:

www.pzits.pl/czlonkostwo