



**POLSKIE ZRZESZENIE
INŻYNIERÓW I TECHNIKÓW
SANITARNYCH**

CZASOPISMO WYDAWANE OD 1921 ROKU

Gaz Woda i Technika Sanitarna

Gas Water & Sanitary Engineering

3

2026

BEZPIECZEŃSTWO ENERGETYCZNE

Miliardy m³
gazu ziemnego
dla Polski



ORLEN

Energia jutra
zaczyna się dziś

STRATEGIA 2035

KOLEGIUM REDAKCYJNE / Editorial Board

REDAKTOR NACZELNY / Editor in Chief

prof. dr hab. inż. Andrzej J. Osiadacz

ZASTĘPCA REDAKTORA NACZELNEGO / Deputy Editor in Chief

dr inż. Piotr Jadwiszczak

REDAKTORZY / Editors

dr hab. inż. Zbysław Dymaczewski – Politechnika Poznańska

dr hab. inż. Wojciech Kostowski – Politechnika Śląska

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

dr hab. inż. Małgorzata Kwestar – Politechnika Warszawska

dr inż. Piotr Manczarski – Politechnika Warszawska

dr hab. inż. Jerzy Mikosz – Politechnika Krakowska

dr Grzegorz 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, Portugal

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 03/2026

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. Licencjobiorcą jest PZITS.

PRZESYŁANIE ARTYKUŁÓW / Submission

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

SPIS TREŚCI / Contents

Aneta Ceglińska, Amelia Zielińska, Piotr Mońka, Agnieszka Sobianowska-Turek¹

Nickel recovery potential from thermally treated waste printed circuit boards in hydrometallurgical processes

Potencjał odzysku niklu z termicznie przetworzonych odpadowych płytek drukowanych w procesach hydrometalurgicznych

2

Witold Paleczek

Dynamiczne zawyżanie wskazań wodomierza wirnikowego wywołane poduszką powietrzną w pionie instalacyjnym – studium przypadku

Dynamic over-registration of a vane water meter induced by an air pocket in a vertical riser:

a case study

8

Bartosz Wadiak, Joanna Czarnota, Adam Masłoń

PFASs jako przykład antropogenicznych, szkodliwych związków chemicznych obecnych w ściekach komunalnych

PFASs as an example of anthropogenic, harmful chemical compounds present in municipal

wastewater

14

Mozhgan Yarahmadi, Mahmood Rahmani Firozjaei, Nasrin Rastinifard

Artificial intelligence for hydraulic and water resources engineering: Challenges, opportunities and a research agenda

Sztuczna inteligencja w inżynierii wodnej i hydraulice: wyzwania, możliwości i program badawczy

24

Anna Mielniczek, Weronika Urbańska, Hubert Jamry, Aneta Ceglińska

Sustainable intentions vs. consumption paradoxes: young consumers' engagement with second-hand fashion and textile waste management

Zrównoważone intencje a paradoksy konsumpcji: zaangażowanie młodych konsumentów w modę

z drugiej ręki i zarządzanie odpadami tekstylnymi

35

Wojciech Kramarek

Reaktor wędrującej fali TWR

Traveling wave reactor TWR

46

ARTYKUŁY PARTNERSKIE

ORLEN S.A. – Zespół Oddziałów Upstream Polska

Gaz ziemny – paliwo transformacji, surowiec dla przemysłu

22

Wodór z Finlandii dla polskiego przemysłu – ORLEN

podpisuje kluczowe porozumienia

23

ORLEN zwiększa wydobycie. Złoże w Różańsku

włączone do produkcji


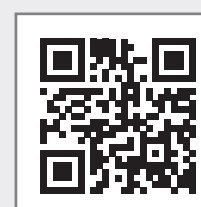
50

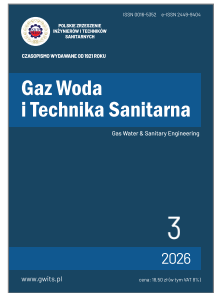
PZITS W DZIAŁANIU

51

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/



Nickel recovery potential from thermally treated waste printed circuit boards in hydrometallurgical processes

Potencjał odzysku niklu z termicznie przetworzonych odpadowych płytek drukowanych w procesach hydrometalurgicznych

Aneta Ceglińska¹, Amelia Zielińska^{2*} , Piotr Mońka³, Agnieszka Sobianowska-Turek¹ 

¹ Faculty of Environmental Engineering, Wrocław University of Science and Technology

² "Poltegor-Institute" Opencast Mining Institute, Parkowa 25, 51-616 Wrocław, Poland

³ EKO PM Sp. z o.o. ul. Mjr. Piwnika-Ponurego, 73/3, 51-321 Wrocław, Poland

*Kontakt / Correspondence: amelia.zielinska@igo.wroc.pl

Abstract:

The growth of waste electrical and electronic equipment has intensified the search for effective recovery technologies of valuable metals from printed circuit boards (PCBs). In this study, the hydrometallurgical behavior and recovery potential of nickel from thermally treated PCB were investigated. The PCB waste was subjected to steam gasification as a pretreatment step, followed by mechanical separation and subsequent leaching using different acidic media, including 2 M sulfuric acid, aqua regia, and dilute acids assisted by ultrasonic treatment. The results indicate that thermal pretreatment improves the accessibility of nickel-bearing phases and promotes their dissolution during hydrometallurgical processing. Leaching efficiency depended on the leaching agent and particle size. Ultrasound-assisted leaching with dilute acids further enhanced nickel extraction.

Keywords: PCB, recycling, steam gasification, circular economy

Streszczenie:

Wzrost ilości zużytego sprzętu elektrycznego i elektronicznego sprzyja rozwojowi technologii odzysku metali z odpadowych płytek obwodów drukowanych (PCB). W pracy oceniono potencjał hydrometalurgicznego odzysku niklu z materiału PCB poddanego wstępnej obróbce termicznej metodą zgazowania parą wodną. Po separacji mechanicznej na frakcje ziarnowe przeprowadzono ługowanie w różnych środowiskach kwaśnych, w tym w 2 M H₂SO₄, wodzie królewskiej oraz rozcieńczonych kwasach wspomaganymi ultradźwiękami. Wyniki wskazują, że obróbka termiczna zwiększa dostępność faz niklośnych i sprzyja ich rozpuszczaniu. Efektywność ługowania zależała od rodzaju czynnika ługującego oraz wielkości ziaren. Zastosowanie ultradźwięków dodatkowo intensyfikowało proces ługowania.

Słowa kluczowe: PCB, recykling, zgazowanie parą wodną, gospodarka o obiegu zamkniętym

1. Introduction

The dynamic growth of the global economy has led to a substantial increase in the production of electrical and electronic equipment. Both technological innovation and market expansion accelerate the replacement cycles of electrical and electronic equipment (EEE), resulting in the large-scale generation of waste electrical and electronic equipment (WEEE).

One of the core component of WEEE – waste printed circuit boards (WPCBs), is classified as hazardous waste. The core layers of PCBs are conventionally composed of fiber-reinforced lamina-

tes impregnated with flame-retardant resins containing bromine and chlorine. The presence of organic fractions in the laminate, as well as its advantageous properties such as high resistance to environmental conditions and mechanical strength, become major drawbacks during disposal and treatment processes. The wide range of applications, mass production, and extensive use of fiber-reinforced laminates generate a growing stream of this type of waste, which, after the end of its service life, is often disposed of in an unchanged form in landfills. As materials that are resistant to degradation, they pose a long-term environmental challenge. On the other hand, the copper content in PCB lami-

nates, as well as the presence of glass fibers and precious metals (Au, Ag, Pd) in finished printed circuit boards makes them economically attractive from a resource recovery perspective [1]. In addition to copper and precious metals, PCBs also contain base and accompanying metals such as tin, lead, aluminum, and nickel. Nickel is widely used in electronics as a component of protective coatings, intermediate layers in electroplated connections, and structural elements of connectors [2].

Beyond its functional role in electronic components, nickel is a transition metal of high industrial relevance, primarily consumed in the production of stainless steel, high-performance alloys, electroplated coatings, and battery materials. Approximately 70% of global nickel production is directed toward stainless steel manufacturing, while additional applications include chemical components and industrial catalysts [3]. Owing to its strategic importance for modern industry and energy transition goals, nickel is increasingly considered in European assessments of critical and strategic raw materials, particularly in battery-grade quality, which is essential for electromobility and energy storage technologies [4].

In the context of electronic waste recycling, such as waste printed circuit boards, nickel present in ionic form in hydrometallurgical process solutions represents a potentially valuable secondary raw material. Although nickel concentrations in these solutions are typically lower than those found in primary ores, its recovery may contribute to closing material loops, reducing dependence on primary resources, and mitigating the environmental burden associated with the extraction and processing of critical metals [5].

Nickel is recovered at various stages of industrial processing of both primary and secondary resources using integrated pyrometallurgical-hydrometallurgical routes. Such approaches are increasingly applied in large-scale recycling facilities treating complex waste streams, including end-of-life electronics. Industrial installations, such as those operated by Umicore and Aurubis (Kayser Recycling System, Lünen, Germany), process electronic waste through smelting followed by electrorefining and hydrometallurgical treatment. These processes enable the recovery of nickel alongside other valuable metals, primarily copper and selected precious metals. In the Aurubis KRS process, nickel is recovered from the electrolyte, typically in the form of nickel sulfate, allowing its further industrial utilization [6, 7].

In hydrometallurgical processes applied to electronic waste, including printed circuit boards, nickel is typically transferred into the liquid phase in the form of Ni^{2+} ions in acidic leaching solutions. The presence of nickel in post-process solutions represents both a technological challenge and a potential opportunity for its recovery as a secondary raw material. As highlighted in studies on non-ferrous metal hydrometallurgy, the effective management and separation of nickel ions from leachates is a key aspect in the design of efficient metallurgical process flowsheets [8, 9].

This paper presents the outcomes of collaborative research conducted with EKO PM Ltd., a company involved in the processing of various multi-material waste streams, in particular waste electrical and electronic equipment, using steam gasification combined with hydrometallurgical treatment routes [10].

The aim of this study was to discuss the potential for nickel re-

covery from thermally treated waste PCB material using selected hydrometallurgical processes, as well as to provide a preliminary assessment of the relevance of this phenomenon from the perspective of the design and operation of recycling installations treating waste streams containing this element.

2. Materials and methods

2.1. Research material

The research material consisted of waste type A printed circuit boards (PCBs), which were used in steam-atmosphere gasification experiments. The material was prepared by EKO PM Ltd. Steam gasification was carried out in accordance with the assumptions of the patented technology [11], using an integrated reactor equipped with a gas cooling and steam condensation zone. The main products of the process were a solid residue and a hydrogen-enriched synthesis gas. The solid product comprised metallic and mineral fractions. Gasification enabled the recovery of metallic and ceramic components in an essentially unchanged form, close to their original state. Following the gasification process, the resin-bonded layers of mineral fibres within the PCB laminate became loosened, which allowed for the mechanical separation of individual components and their subsequent processing by hydrometallurgical methods in order to obtain pure metals and their concentrates. Figure 1 illustrates a PCB after the gasification process.



Fig. 1. Waste printed circuit board (PCB) after gasification in a steam atmosphere [12]

Rys. 1. Odpadowa płyta obwodu drukowanego (PCB) po procesie zgazowania w atmosferze pary wodnej [12]

The solid residue remaining after the gasification process was subjected to grinding in a ball mill, followed by fractional separation into 18 fractions. Subsequently, taking into account the sample sizes, eight main fractions were distinguished. In the next stage, the physical properties of the material were considered, and further separation was performed within the range of the main fractions.

2.2. Research methodology

Hydrometallurgical approach

First, the sample was rinsed with distilled water. This step was performed only for fraction No. 1 (<0.1 mm). The solid-to-liquid ratio was 1:5. The experiment was conducted for 1 h at the process temperature with a stirring speed of 800 rpm. After completion, the sample was pressure-filtered using a Büchner funnel.

In the next stage, acidic leaching with 2 M sulfuric acid (H_2SO_4) was carried out according to the procedure shown in Fig. 2. The following fractions were selected for this step: 1, 2, 3, 4, 5A, 5B, 5C, 6A, 6D, 6E, 7 and 8A. According to information provided by EKO PM Ltd., these fractions were characterized by the potentially highest metal content.

The subsequent stage involved leaching with aqua regia (AR), prepared from concentrated hydrochloric acid (HCl) and nitric acid (HNO_3) in a volume ratio of 3:1. The same fractions as those used for sulfuric acid leaching were selected for aqua regia leaching. The procedure was analogous to that applied during sulfuric acid leaching (Fig. 2), with the only difference being the

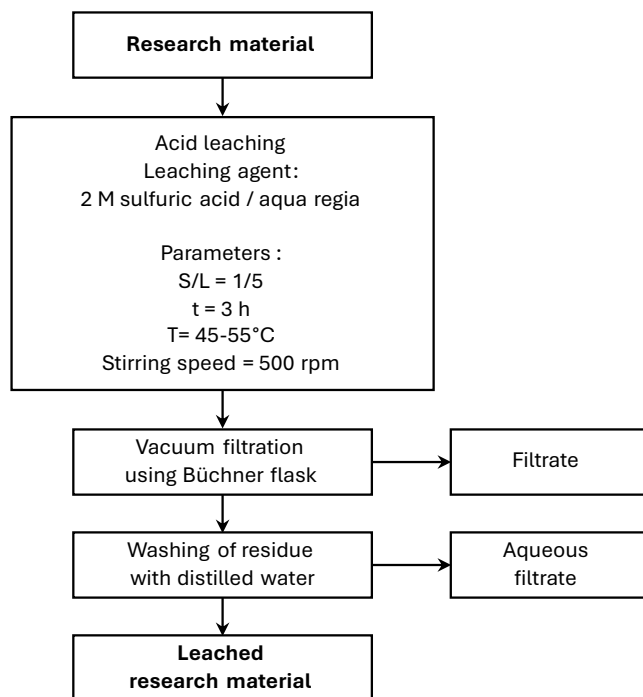


Fig. 2. Scheme of the leaching procedure using 2 M sulfuric acid (H_2SO_4), own study [12]

Rys. 2. Schemat procedury ługowania 2M kwasem siarkowym (VI), opracowanie własne [12]

leaching agent.

Additionally, a portion of the samples was subjected to ultrasound-assisted leaching in order to intensify the contact between the solid phase and the solution and to accelerate dissolution processes. The leaching process in the ultrasonic bath was carried out using less concentrated acids, namely 0.1 M sulfuric acid (H_2SO_4) and 0.1 M nitric acid (HNO_3). This process was applied to fractions that had not been included in the acidic leaching stage. These fractions were excluded mainly due to their larger particle size and low specific surface area (rods, sheets, screws). The fractions subjected to this process were 6B, 6C, 7, 8, 8B and 8C. The process was conducted according to the procedure shown in Fig. 3.

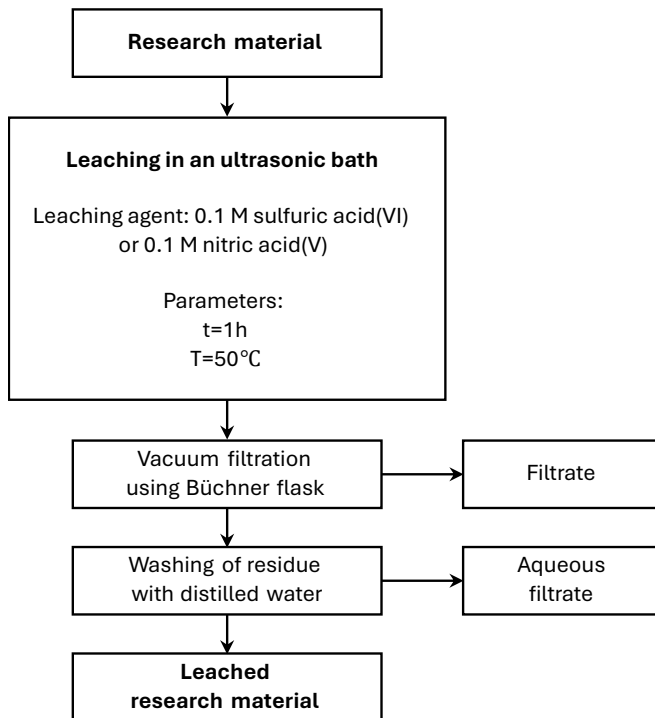


Fig. 3. Flowchart of ultrasound-assisted leaching procedure own study [12]

Rys. 3. Schemat procedury ługowania wspomaganego ultradźwiękami, opracowanie własne [12]

2.3. Analytical method

Gravimetric analysis

After rinsing with water and after each leaching stage, i.e. acidic leaching with 2 M sulfuric acid (H_2SO_4), aqua regia leaching, and ultrasonic bath leaching using 0.1 M sulfuric acid (H_2SO_4) and 0.1 M nitric acid (HNO_3), the solid residues were transferred to pre-weighed crystallizing dishes and dried at $105^\circ C$ for 24 h. The crystallizing dishes containing the material were weighed on an analytical balance after mass stabilization. In this way, mass losses after each leaching stage were determined.

Qualitative and quantitative chemical analysis

In order to determine nickel concentrations in the leachates, inductively coupled plasma optical emission spectrometry (ICP-OES) was applied. The ICP-OES analysis of metal contents was performed for all filtrates, including both aqueous rinses and leachates obtained after each leaching stage, at the GEO-3EM Hydrometallurgical Processes Laboratory of Wrocław University of Science and Technology. The analytical results for individual samples were obtained in mg/L and subsequently recalculated to g/t of sample based on the known volume of the analyzed solution and the initial mass of the sample.

3. Results and discussion

Mechanical processing

The results of the particle size fractionation are presented in Table 1. The results of mechanical size-based separation of waste PCB material after the gasification process indicate a dominant contribution of the fine-grained fraction (0.1 mm), which accounted for nearly half of the total material mass (46.8%). Such a high proportion of this fraction can be attributed to the

preliminary thermal treatment, which led to the loosening of the laminate structure and increased material brittleness, thereby promoting intensive fragmentation. This observation confirms that gasification in a steam atmosphere effectively removes the polymeric fraction of the PCB laminate, facilitating its subsequent mechanical separation.

In this context, fractions with a significant mass contribution are expected to exhibit enhanced nickel leaching due to their increased specific surface area and improved accessibility of reactive surfaces for leaching agents. This is consistent with literature reports indicating the influence of particle size reduction and contact surface area on the kinetics of metal extraction from PCB waste [13]. Fine fractions may contain fragmented nickel-rich electroplated coatings as well as small particles of nickel-based alloys with other metals formed as a result of mechanical disintegration.

In contrast, coarse fractions (>5 mm), consisting of larger fragments of structural components, connectors, and pins, may locally exhibit elevated nickel contents; however, due to their lower specific surface area, their direct processing by hydrometallurgical methods may result in reduced leaching kinetics. In industrial practice, such fractions may require additional comminution or preliminary physical separation to increase the efficiency of nickel transfer into leaching solutions.

The contribution of intermediate fractions (0.1–5 mm) reflects the considerable morphological heterogeneity of the post-process material and the non-uniform distribution of metallic and mineral phases. From the perspective of designing a technological flowsheet for nickel recovery, differentiated treatment of individual size fractions appears justified, whereby fine fractions are directed directly to hydrometallurgical leaching, while coarser fractions are subjected to further mechanical processing or selective metal separation.

Table 1. Fractional division of the research material, own study based on the work [12]

Tabela 1. Podział materiału badawczego na frakcje, opracowanie własne, według [12]

| Sample number | Fraction [mm] | Mass [g] | Percentage share [%] |
|---------------|---------------|----------|----------------------|
| 1 | <0.1 | 1159.86 | 46.8 |
| 2 | 0.1–0.25 | 141.83 | 5.4 |
| 3 | 0.25–0.5 | 100.21 | 3.1 |
| 4 | 0.5–1 | 117.95 | 4.0 |
| 5A | 1–2 | 68.82 | 3.6 |
| 5B | 1–2 | 9.27 | 0.2 |
| 5C | 1–2 | 28.78 | 1.1 |
| 6A | 2–5 | 133.34 | 5.8 |
| 6B | 2–5 | 33.26 | 1.3 |
| 6C | 2–5 | 71.71 | 3.0 |
| 6D | 2–5 | 21.44 | 0.7 |
| 6E | 2–5 | 66.22 | 2.8 |
| 7 | 5–10 | 187.74 | 5.8 |
| 8 | >10 | 200.14 | 6.3 |
| 8A | >10 | 62.28 | 2.6 |
| 8B | >10 | 24.10 | 0.9 |
| 8C | >10 | 137.30 | 6.5 |

Qualitative and quantitative chemical analysis

The results obtained after leaching with 2 M sulfuric acid and aqua regia are presented in Table 2, whereas Table 3 summarizes the ICP-OES results obtained after leaching with less concentrated acids (0.1 M HNO₃ and 0.1 M H₂SO₄) assisted by ultrasonic treatment. The obtained data indicate that the efficiency of nickel transfer into the leaching solution is strongly dependent on the applied leaching agent and the particle size of the post-reaction PCB material. For fine-grained fractions subjected to sequential leaching, the use of 2 M H₂SO₄ enabled partial dissolution of nickel. The measured nickel concentrations in the solutions showed significant variation between individual samples and ranged from approximately 65 g/t to over 3200 g/t, depending on the sample. This variability can be attributed to the heterogeneous distribution of electroplated coatings and nickel-containing alloys within the PCB laminate, which is commonly reported in the literature on electronic waste [4, 17]. In addition, the observed behavior is consistent with the known resistance of nickel to dissolution in non-oxidizing mineral acids under moderate temperature and redox conditions in hydrometallurgical systems [9].

Much higher nickel concentrations were observed after secondary leaching of the same fractions with aqua regia. The measured nickel contents ranged from approximately 1200 g/t to over 35,000 g/t. These results indicate that a significant portion of nickel remains bound in forms that are poorly soluble in sulfate media. Such forms include Ni–Cu and Ni–Fe alloys, as well as passivated metallic layers, which are not effectively dissolved in 2 M H₂SO₄. Due to its strong oxidizing properties and its ability to break down alloy structures, aqua regia enables a much more complete transfer of nickel into the liquid phase. This confirms its high efficiency as a reference leaching agent in metal balance studies [7, 15]. However, such an aggressive leaching environment is less suitable for industrial application because of safety concerns, equipment corrosion, and the complexity of solution treatment.

Table 2. Nickel content results for different leaching agents [12]

Tabela 2. Wyniki zawartości niklu dla różnych czynników ługujących [12]

| Sample number | Ni | | |
|---------------|----------------------------|-----------------------------------|-------|
| | Aqua | 2M H ₂ SO ₄ | AR |
| | [g/t] | | |
| 1W | <LOD | n.a. | n.a. |
| 1 | n.a. | 3230 | 4486 |
| 2 | n.a. | 1603 | 7838 |
| 3 | n.a. | 209.2 | 8668 |
| 4 | n.a. | 96.61 | 7591 |
| 5A | n.a. | 70.37 | 4804 |
| 5B | n.a. | 1670 | 35276 |
| 5C | n.a. | 66.99 | 6381 |
| 6A | n.a. | 64.91 | 1996 |
| 6D | n.a. | 76.58 | 2588 |
| 6E | n.a. | 66.62 | 1233 |
| 7 | n.a. | 119.0 | 1879 |
| 8A | n.a. | 150.7 | 539.7 |
| | <i>n.a. – not analysed</i> | | |

Table 3. Nickel content after ultrasound-assisted leaching [2]
Tabela 3. Wyniki zawartości niklu po procesach ługowania
 wspomaganym ultradźwiękami [2]

| Sample number | Ni | |
|---------------|-------------------------------------|-----------------------|
| | Ultrasonic bath leaching | |
| | 0.1M H ₂ SO ₄ | 0.1M HNO ₃ |
| | g/t | |
| 6B | 494 | 301 |
| 6C | 193 | 324 |
| 7 | 30 | 89 |
| 8 | 299 | 242 |
| 8B | 252 | 349 |
| 8C | 38 | 3 |

The application of ultrasound in combination with less concentrated acid solutions increased the efficiency of nickel transfer into the liquid phase. This effect is attributed to enhanced mass transport, improved surface wetting, and easier penetration of the leaching solution into the porous structure of the thermally treated material, in agreement with previous studies on ultrasound-assisted hydrometallurgical processes [16, 17].

A comparison of both leaching agents does not indicate a clear advantage of either sulfuric or nitric acid. Higher nickel concentrations were observed in H₂SO₄ for some samples (e.g., 6B and 8), whereas HNO₃ was more effective for others (e.g., 6C, 7, and 8B). The lack of a consistent trend suggests that leaching efficiency is mainly controlled by the local mineralogy and the form of nickel in a given fraction, including electroplated coatings and Ni-Cu or Ni-Fe alloys [13, 14].

Relatively low nickel concentrations, particularly in samples below 50 g/t, may reflect either a low nickel content in the investigated fractions or limited leaching kinetics associated with compact structures and low specific surface area.

The presence of nickel in post-leaching solutions has important technological implications. On the one hand, it indicates the potential for secondary recovery of nickel as an accompanying metal in PCB recycling processes, in line with the principles of the circular economy and the growing need to diversify sources of technologically important metals [18]. On the other hand, nickel ions represent an additional burden for solution treatment systems, as they require effective removal and lead to the generation of secondary residues [8].

The obtained results confirm that the design and operation of electronic waste recycling installations should consider not only major metals but also accompanying metals such as nickel, which can significantly affect process balances and solution treatment requirements. An integrated approach combining pyrometallurgical and hydrometallurgical stages enables the potential utilization of nickel-bearing streams as secondary raw materials in modern metal recycling systems.

6. Conclusions

The conducted study demonstrated that nickel, although not being the primary target of metal recovery from waste printed circuit boards, is transferred to hydrometallurgical solutions to a significant extent after the thermal treatment of PCB material by steam gasification. The degree of nickel dissolution was

strongly dependent on the applied leaching agent and process conditions. More aggressive leaching environments, particularly aqua regia, promoted enhanced dissolution of nickel-containing phases present in the PCB structure, while sulfuric acid enabled only partial nickel extraction.

Thermal pre-treatment of PCB material resulted in a pronounced loosening of the laminate structure and an increase in material brittleness, which improved the accessibility of metallic phases for hydrometallurgical reagents. This effect was particularly evident for fine-grained fractions, characterized by a higher specific surface area and more intensive nickel transfer into the liquid phase. Ultrasound-assisted leaching further intensified nickel dissolution when using dilute acids, confirming the beneficial role of physical process intensification methods in enhancing mass transfer and leaching kinetics.

From a technological perspective, the presence of nickel ions in post-leaching solutions represents both an opportunity and a challenge. On the one hand, nickel-bearing process streams constitute a potential secondary raw material that could be integrated into circular economy-oriented recycling schemes. On the other hand, dissolved nickel increases the load on wastewater treatment systems, contributing to the formation of metal hydroxide sludges and generating additional secondary residues requiring further management.

The results obtained in this study indicate that accompanying non-ferrous metals such as nickel should be systematically considered in process mass balances and in the design of hydrometallurgical circuits for WEEE recycling. Even when nickel is not the primary recovery target, its behavior in process solutions significantly affects the technological performance, environmental footprint, and overall sustainability of integrated pyrometallurgical-hydrometallurgical recycling installations.

7. References

- [1] Zielińska A. (2024). *Steam gasification of waste printed circuit board laminates – The role of a clay-based catalytic bed in the conversion of volatile gasification products*. PhD Thesis, Wrocław University of Science and Technology.
- [2] Martinez-Ballesteros, G., Valenzuela-Garcia, J. L., Gomez-Alvarez, A., Encinas-Romero, M. A., Mejia-Zamudio, F. A., & Rosas-Durazo, A. D. J. (2023). Base metals extraction from printed circuit boards by pressure acid leaching. *Minerals*, 13(1), 98. <https://doi.org/10.3390/min13010098>
- [3] European Commission. Strategic raw materials factsheet: Nickel (battery grade); Directorate-General for Internal Market, Industry, Entrepreneurship and SMEs, (2025). Available online: <https://single-market-economy.ec.europa.eu>
- [4] European Commission. (2025). *Strategic raw materials factsheet: Nickel (battery grade)*. Directorate-General for Internal Market, Industry, Entrepreneurship and SMEs. Retrieved January 25, 2026, from <https://single-market-economy.ec.europa.eu>
- [5] Jadhav, U., & Hocheng, H. (2017). Hydrometallurgical recovery of metals from large printed circuit board pieces. *Scientific Reports*, 5, 14574. <https://doi.org/10.1038/srep14574>
- [6] Aurubis. *Recycling technology*. Retrieved January 25, 2026, from <https://www.aurubis.com/en/products/recycling/technology>
- [7] Hagelüken, C. (2006). Recycling of electronic scrap at Umi

- core's integrated metals smelter and refinery. *World of Metallurgy – ERZMETALL*, 59(3), 152–161.
- [8] Crundwell, F. K., Moats, M. S., Ramachandran, V., Robinson, T. G., & Davenport, W. G. (2011). *Extractive metallurgy of nickel, cobalt and platinum-group metals*. Elsevier.
- [9] Gupta, C. K., & Mukherjee, T. K. (1990). *Hydrometallurgy in extraction processes*. CRC Press.
- [10] Mońka, P., Szczepaniak, W., & Sopianowska-Turek, A. (2024). *Gazowanie odpadów WEEE – technologia przyszłości? Energia i Recykling*, (4), 24–26.
- [11] Szczepaniak W., Zabłocka-Malicka M., Zielińska A., (2020). Sposób wysokotemperaturowego odzysku materiałów złożonych z odpadów i układ do wysokotemperaturowego odzysku materiałów złożonych z odpadów. Patent PL 235360 B1.
- [12] Ceglińska A., (2024). *Recovery of metals from secondary raw materials using selected hydrometallurgical methods*. Diploma Thesis, Wrocław University of Science and Technology
- [13] Cui J., Zhang L., (2008). Metallurgical recovery of metals from electronic waste: A review. *Journal of Hazardous Materials*, 158(2–3), 228–256. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2008.02.001>
- [14] Tuncuk A., Stazi V., Akcil A., Yazici E.Y., Devci H., (2012). Aqueous metal recovery techniques from e-scrap: Hydrometallurgy in recycling. *Minerals Engineering*, 25(1), 28–37. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2011.09.019>
- [15] İşildar, A., van de Vossenberg, J., Rene, E. R., van Hullebusch, E. D., & Lens, P. N. L. (2019). Two-step leaching of valuable metals from discarded printed circuit boards (PCBs). *Waste Management*, 84, 89–101. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2018.11.024>
- [16] Meshram, P., Abhilash, Kumar, V., & Pandey, B. D. (2019). Ultrasound-assisted leaching of metals: A review. *Ultrasonics Sonochemistry*, 52, 155–170. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2018.11.012>
- [17] Rydberg, J., Cox, M., Musikas, C., & Choppin, G. R. (2004). *Solvent extraction principles and practice*. Marcel Dekke. <https://doi.org/10.1201/9780203021460>
- [18] International Energy Agency. (2021). *The role of critical minerals in clean energy transitions*. International Energy Agency.

Wydział Inżynierii Środowiska
Politechniki Warszawskiej

Studia podyplomowe INŻYNIERIA GAZOWNICTWA

TEMATYKA STUDIÓW

- Nowoczesne techniki i metody zarządzania w gazownictwie
- Komputerowe modelowanie sieci gazowych
- Transport i magazynowanie, dystrybucja i użytkowanie gazu, wodoru i biometanu oraz ich mieszanin
- Wychwytywanie i transport CO₂
- Techniki pomiarowe, zagadnienia ekonomiczne i prawne

FORMA STUDIÓW

Studia w całości prowadzone są w trybie stacjonarnym – zajęcia prowadzone są w Gmachu Inżynierii Środowiska Politechniki Warszawskiej.

Zajęcia odbywają się w weekendy zjazdowe w godzinach:

- sobota 12:00 – 20:00
- niedziela 8:00 – 16:00

Studia są dwusemestralne. Kończą się egzaminami pisemnymi. W drugim semestrze Studenci wykonują pracę projektową.

WYKŁADOWCY

Wykładowcy to pracownicy Politechniki Warszawskiej, Politechniki Śląskiej i Politechniki Gdańskiej oraz przedstawiciele firm gazowniczych lub podmiotów współpracujących z sektorem gazownictwa.



MODUŁY TEMATYCZNE

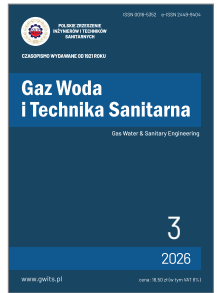
Program studiów obejmuj dziesięć modułów tematycznych:

- I. Projektowanie sieci gazowych
- II. Komputerowe metody obliczania sieci gazowych
- III. Techniczne problemy przesyłu i magazynowania gazu
- IV. Techniczne problemy dystrybucji i użytkowania gazu
- V. Nowe technologie w procesie dekarbonizacji gazownictwa
- VI. Gospodarka wodorowa (wytwarzanie, transport, magazynowanie)
- VII. Gospodarka biometanowa (biogaz, biometan, transport biometanu)
- VIII. Problemy transportu siecią gazową mieszanin gazu ziemnego z wodorem / biometanem
- IX. Problemy rozliczania dostarczanych odbiorcom mieszanin gazu ziemnego z wodorem / biometanem
- X. Technologie wychwyty oraz transportu rurociągowego dwutlenku węgla

WIZYTY STUDYJNE

Przewidziane są wizyty studyjne w: zakładzie produkcji biogazu, zakładzie produkcji zewnętrznych i wewnętrznych izolacji antykorozyjnych rur stalowych, terminalu LNG, kawernowym magazynie gazu oraz w zakładzie produkcji wodoru.

Informacje i rekrutacja: irk.pw.edu.pl



Dynamiczne zawyżanie wskazań wodomierza wirnikowego wywołane poduszką powietrzną w pionie instalacyjnym – studium przypadku

Dynamic over-registration of a vane water meter induced by an air pocket in a vertical riser: a case study

Witold Paleczek^{1*} 

¹ Wydział Budownictwa, Politechnika Częstochowska

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

Streszczenie:

Przedstawiono wpływ poduszki powietrznej powstającej w pionie instalacji po pracach na niższych kondygnacjach na zawyżenie wskazań wodomierzy wirnikowych. Sprężone pod licznikiem powietrze, uwięzione wskutek braku odpowietrzenia, przy nagłym otwarciu przepływu (np. zaworu uruchamiającego spłuczkę) gwałtownie się rozpręża i uderza w łopatki wirnika, chwilowo go rozpędzając do czasu napłynięcia wody. Opracowano matematyczny model dynamiczny zjawiska, sprowadzony do postaci liniowej wraz z przykładami obliczeniowymi.

Słowa kluczowe: przepływ powietrza przez wodomierz, zawyżenie wskazań wodomierza, wodomierz wirnikowy, przepływ impulsowy, poduszka powietrzna w instalacji, mieszanina ciecz-gaz

Abstract:

The study presents the influence of an air pocket formed in a vertical water-supply riser after maintenance work on lower floors on the over-registration of vane-type water meters. Compressed air trapped beneath the meter due to insufficient venting rapidly expands when the flow is suddenly opened (e.g., by a flush valve actuator), striking the rotor blades and momentarily accelerating the impeller until water arrives and slows it down. A dynamic mathematical model of the phenomenon was developed, reduced to a linear form and supplemented with calculation examples.

Keywords: air flow through water meters, water meter over-registration, vane water meter, impulsive flow, air pocket in water installations, liquid-gas mixture

1. Wprowadzenie

W instalacjach wodociągowych budynków wielokondygnacyjnych często dochodzi do lokalnego opróżnienia przewodów podczas prac remontowych. Typowym scenariuszem eksploatacyjnym jest wymiana armatury na niższej kondygnacji, wymagająca zamknięcia zaworu odcinającego i opróżnienia fragmentu pionu. W wyniku grawitacyjnego spływu wody w przewodzie tworzą się liczne kieszenie powietrzne, które w miarę spływu wody łączą się, tworząc poduszkę powietrzną.

Jeżeli odcinek ten znajduje się bezpośrednio pod wodomierzem wirnikowym na najwyższej kondygnacji, to po przywróceniu zasilania instalacji uwięzione powietrze zostaje sprężone do ciśnienia roboczego. Użytkownik najwyższej kondygnacji, nieinformowany o prowadzonych pracach, nie wykonuje bezpiecznego odpowietrzenia in-

stalacji, co prowadzi do czasowego zalegania poduszki powietrznej pod wodomierzem.

Pierwsze uruchomienie zaworu napełniającego zbiornik spłukujący powoduje nagłe otwarcie przepływu za wodomierzem. Sprężone powietrze ulega szybkiemu rozprężeniu, generując impuls przepływu o dużej intensywności, który chwilowo zwiększa prędkość obrotową wirnika. W rezultacie wodomierz rejestruje dodatkowe obroty niewspółmierne do rzeczywistego przepływu wody. Zjawisko to jest trudne do zaobserwowania bezpośrednio, lecz możliwe do zarejestrowania za pomocą rejestracji wideo.

2. Mechanizm powstawania zjawiska

Opróżnienie pionu w wyniku prac na niższej kondygnacji prowadzi do powstania poduszki powietrznej. Przywrócenie ciśnienia powoduje sprężenie uwięzionego po-

wietrza do ciśnienia roboczego instalacji (np. 4–6 bar). Brak odpowietrzenia na najwyższej kondygnacji skutkuje utrzymaniem poduszki powietrznej bezpośrednio pod wodomierzem. Pierwsze otwarcie automatycznego zaworu napełniającego zbiornik spłukujący wywołuje gwałtowne rozprężenie powietrza i impuls przepływu. Impuls rozprężającego się powietrza z aerozolem wodnym powoduje gwałtowne rozpędzenie wirnika i rejestrację przepływu przez wodomierz. Nadmierne wskazanie obejmuje: rzeczywisty przepływ wody, przepływ sprężonego powietrza oraz dodatkowe obroty wynikające z bezwładności wirnika przy braku oporu hydraulicznego.

3. Czas trwania zjawiska

Jeżeli prace prowadzono jedną kondygnacją niżej, powstaje niewielka, zwarta poduszka powietrzna; jej rozprężenie trwa 2–3 s. Jeżeli prace prowadzono kilka kondygnacji niżej, w pionie gromadzi się większa objętość powietrza, tworzą się liczne lokalne pęcherze oraz złożona, niejednorodna mieszanina ciecz–gaz z aerozolem wodnym.

Po otwarciu przepływu obserwuje się: kolejne impulsy przepływu, przemieszczanie i łączenie pęcherzyków oraz wielokrotne przyspieszanie i hamowanie wirnika. W efekcie dochodzi do przejściowego zaburzenia pracy wodomierza, utrzymującego się przez 10–15 s – do czasu, aż napływająca woda ustabilizuje przepływ i przywróci prawidłowy pomiar.

4. Rzędy wielkości nadmiarowego wskazania: 1–100 dm³

Statyczna objętość gazu (1–2 dm³) nie wyjaśnia obserwowanych nadwyżek. Wyjaśnienie zapewnia model dynamiczny, uwzględniający: impuls przepływu rzędu 1–2 dm³/s, czas trwania 2–15 s, wielokrotne rozpędzanie wirnika, bezwładność powodującą dodatkowe obroty, nieliniową charakterystykę wodomierza przy dużych prędkościach. W rezultacie wodomierz może zarejestrować nadmiarowe wskazanie rzędu 1–100 dm³, mimo że rzeczywista ilość wody była niewielka.

5. Wnioski praktyczne

Poduszki powietrzne w pionach mogą prowadzić do znacznych błędów pomiarowych. Odpowietrzanie najwyższych kondygnacji po pracach instalacyjnych jest konieczne. Wodomierze mechaniczne są szczególnie podatne na impulsy przepływu. Opisane zjawisko jest zgodne z mechaniką mieszanin ciecz-gaz oraz dynamiką wirnika wodomierza.

6. Przegląd literatury przedmiotu

Zjawiska związane z obecnością uwięzionego powietrza w przewodach ciśnieniowych oraz ich wpływem na przepływy nieustalone były szeroko analizowane w hydraulicznych przepływach przejściowych. Klasyczne prace Berganta,

Tijsselinga i współautorów [1] wykazały, że nawet niewielkie objętości powietrza istotnie modyfikują amplitudę i przebieg fal ciśnienia, działając jak element sprężysty zdolny do akumulacji i gwałtownego uwalniania energii. Podobne wnioski przedstawili Zhou i Karney [2], którzy opisali dynamiczne rozprężanie poduszek powietrznych podczas napełniania przewodów oraz generowanie krótkotrwałych impulsów przepływu o intensywności przekraczającej wartości nominalne. Autorzy podkreślają, że przepływ powietrza może mieć charakter pulsacyjny, a sekwencja impulsów może utrzymywać się przez kilkanaście sekund do osiągnięcia stanu ustalonego.

W literaturze dotyczącej uderzeń hydraulicznych zwraca się uwagę, że obecność powietrza może zarówno tłumić, jak i wzmacniać zjawiska nieustalone, zależnie od lokalizacji i stopnia sprężenia poduszki. Ferreira, Ferras i Covas [3] wykazali, że powietrze w przewodzie stanowi aktywny element układu hydraulicznego, znacząco wpływający na dynamikę ciśnienia i prędkości przepływu. Wyniki badań eksperymentalnych Malesińskiej, Knapa, Kubraka i Kodury [4] potwierdzają, że uwięzione powietrze może generować złożone sekwencje impulsów przepływu, których charakter zależy od geometrii instalacji, długości opróżnionego odcinka oraz stopnia sprężenia gazu.

W kontekście metrologii przepływu istotne są prace dotyczące wpływu przepływów nieustalonych na dokładność wodomierzy mechanicznych. Wykazano, że impulsy przepływu o dużej intensywności i krótkim czasie narastania mogą prowadzić do dodatkowych obrotów wirnika, wynikających z jego bezwładności oraz nieliniowej charakterystyki momentu napędowego. W efekcie wodomierz rejestruje objętości niewspółmierne do rzeczywistego przepływu.

Zestawienie wyników badań literaturowych wskazuje jednoznacznie, że uwięzione poduszki powietrzne w przewodach wodociągowych mogą generować impulsy przepływu o istotnym znaczeniu dla dynamiki układu oraz dokładności pomiaru. Obserwacje przedstawione w niniejszym studium przypadku są zgodne z wynikami Pozos-Estrady [5], który podkreśla kluczową rolę lokalizacji poduszki powietrznej. Poduszka umiejscowiona bezpośrednio pod wodomierzem wywołuje szczególnie silny impuls przepływu, działający bezpośrednio na wirnik i prowadzący do dynamicznego zawyżenia wskazań.

7. Matematyczny liniowy model dynamiczny oddziaływania impulsu przepływu na wodomierz

W analizowanym problemie licznik został zamodelowany tak, jak wirnik o pewnej bezwładności, obracający się z prędkością kątową $\omega(t)$, do którego działają momenty: od przepływu medium (powietrze/woda), straty tarcia (łożyska, hamowanie magnetyczne, lepkość). Zależność (1) odpowiada standardowemu modelowi momentu hydrodynamicznego stosowanemu w przepływomierzach turbinowych: moment przepływu określa zależność [6–9]:

$$\tau_{hyd}(t) = k_t \cdot \rho \cdot v(t)^2 \quad (1)$$

gdzie:

k_τ – współczynnik aerodynamiczny wirnika z uwzględnieniem geometrii licznika, m^3

ρ – gęstość medium (powietrza/wody), kg/m^3

$v(t)$ – prędkość przepływu w przekroju wirnika, m/s

Moment strat (uproszczony: liniowy):

$$\tau_{str} = -b \cdot \omega(t) \quad (2)$$

gdzie:

b – współczynnik: tarcie w trakcie obrotów, Nms .

Równanie ruchu można określić wzorem:

$$J \frac{d\omega}{dt} = \tau_{hyd}(t) + \tau_{str}(t) = k_\tau \cdot \rho \cdot v(t)^2 - b \cdot \omega(t) \quad (3)$$

Powiązanie między prędkością kątową a przepływem objętościowym:

$$Q(t) = k_Q \cdot \omega(t) \quad (4)$$

gdzie:

k_Q – stała przeliczeniowa licznika, $m^3/obrót$

Objętość zarejestrowana przez licznik:

$$V_{ind} = \int_0^\infty Q(t)dt = k_Q \cdot \int_0^\infty \omega(t)dt \quad (5)$$

Faza „przedmuchu” – impuls momentu od sprężonego powietrza: przyjmując, że w odcinku rury przed licznikiem znajduje się kieszeń sprężonego powietrza o objętości V_{air} o ciśnieniu początkowym $P_0 > P_{wody}$, która w momencie otwarcia zaworu/ruszenia przepływu rozpręża się, generując impuls przepływu powietrza przez licznik, dając duży, krótkotrwały moment na wirnik, zatem można przyjąć uproszczony model jako impuls momentu:

$$I_\tau = \int_0^{T_{air}} \tau_{air}(t)dt \quad (6)$$

Impuls ten powoduje skok prędkości kątowej wirnika:

$$\omega_0 = \frac{I_\tau}{J} \quad (7)$$

Wchodząc w fazę wygaszania, gdy już napływa woda, czyli gdy przepływ maleje/stabilizuje się można wyizolować sam efekt przedmuchu, gdy powietrze dało impuls, wtedy zachodzi ω_0 , następnie przez krótki czas przyjmujemy, że dalszy moment hydrodynamiczny od powietrza jest zaniedbywalny, a licznik hamuje pod wpływem strat, to zachodzi:

$$J \frac{d\omega}{dt} = -b\omega \Rightarrow \omega(t) = \omega_0 e^{-\frac{t}{\tau}} \quad (8)$$

gdzie:

$\tau = \frac{J}{b}$ – stała czasowa wygaszania obrotów (charakterystyczny czas „zwalniania obrotów”), s

Wkład do zliczonej objętości tylko z efektu przedmuchu można otrzymać z zależności:

$$\Delta V_{air} = k_Q \int_0^\infty \omega(t)dt = k_Q \int_0^\infty \omega_0 e^{-\frac{t}{\tau}} dt = k_Q \omega_0 \tau \quad (9)$$

Podstawienie (7) $\omega_0 = \frac{I_\tau}{J}$ do (9) prowadzi do wniosku, że nadmiarowo zarejestrowana objętość ΔV_{air} jest proporcjonalna do impulsu momentu od powietrza I_τ oraz odwrotnie proporcjonalna do efektów tarcia wyrażonych przez parametr b : wirnik o małym hamowaniu kręci się dłużej, a wynika to z formuły określonej wzorem:

$$\Delta V_{air} = k_Q \tau \frac{I_\tau}{J} = k_Q \frac{J I_\tau}{b J} = k_Q \frac{I_\tau}{b} \quad (10)$$

Powiązanie impulsu momentu z ciśnieniem powietrza można uzyskać łącząc ciśnienie powietrza w kieszeni P_0 , przekrój rury/wirnika A , promień efektywny działania siły na łopatki r oraz czas trwania przedmuchu T_{air} , co można opisać średnią siłą na łopatkach:

$$F_{air} \approx (P_0 - P_{down}) \cdot A_{ef} \quad (11)$$

Przy czym średni moment oraz impuls momentu można określić zależnościami:

$$\bar{\tau}_{air} \approx F_{air} \cdot r \text{ oraz } I_\tau = \tau_{air} \cdot T_{air} \quad (12), (13)$$

Które podstawione do wzoru ΔV_{air} prowadzą do zależności:

$$\Delta V_{air} \approx k_Q \frac{1}{b} \cdot F_{air} \cdot r \cdot T_{air} \quad (14)$$

W której zachodzi proporcjonalność:

$$\Delta V \propto (P_0 - P_{down}) \cdot T_{air} \quad (15)$$

Z powyższego wnioskujemy, iż: im większe nadciśnienie powietrza, im dłużej trwa „przedmuch”, im mniejsze hamowanie licznika (jeśli parametr b jest mały), tym większe zawyżenie wskazania ΔV .

Po uwzględnieniu modelu ruchu wirnika określonego wzorem (3), czyli $J \frac{d\omega}{dt} = \tau_{hyd}(t) + \tau_{str}(t) = k_\tau \cdot \rho \cdot v(t)^2 - b \cdot \omega(t)$, a następnie wykorzystując związek przepływu z ciśnieniem w fazie powietrze/woda, charakteryzujące się tym, że stosujemy uproszczony model korka powietrza rozprężającego się w odcinku rury, możemy przedstawić możliwość modelu kalibracji, w którym k_Q , b , k_τ kalibrowane są z testów z kontrolowanymi przedmuchi: wtedy model przewiduje ΔV dla dowolnych P_0 , T_{air} .

Jeżeli przyjmiemy, że średnie nadciśnienie powietrza w okresie działania na wirnik wynosi: $\Delta P = P_0 - P_{down}$, efektywny przekrój, przez który działa ciśnienie na łopatki A_{ef} , a efektywny promień działania siły to r_{ef} , wtedy średnia siła wyraża się wzorem (16) i uśredniony moment wzorem (17).

$$F_{air} \approx \Delta P \cdot A_{ef} \quad \tau_0 \approx F_{air} \cdot r_{ef} = \Delta P \cdot A_{ef} \cdot r_{ef} \quad (16), (17)$$

Po podstawieniu do (14) otrzymujemy model:

$$\Delta V \approx k_Q \frac{\Delta P \cdot A_{ef} \cdot r_{ef} \cdot T_{air}}{b} \quad (18)$$

w którym:

ΔP – nadciśnienie powietrza, N/m^2

T_{air} – czas trwania przedmuchu, s

A_{ef} , r_{ef} , b , k_Q – łącznie: jako współczynnik skalujący, lub zestaw parametrów (A_{ef} [m^2], r_{ef} [m], b [$kg \cdot m^2/s$], k_Q [m^3]), w którym wartości można oszacować z faktycznej geometrii układu lub potraktować jako empiryczne parametry dopasowywane eksperymentalnie.

Impuls momentu hydrodynamicznego $I_\tau = \int_0^{T_{air}} \tau_{air}(t)dt$ [Nms] określony wzorem (6) można rozpatrywać jako model zgodny z logiką rozprężania (silny start, następnie słabnący impuls), to funkcję podcałkową można przyjąć jako:

$$\tau_{air}(t) = \tau \exp\left(\frac{-t}{T}\right)_{max} \quad (19)$$

gdzie:

τ_{max} – początkowy moment od „uderzenia” powietrza, Nm

T – charakterystyczny czas rozprężania/zanikania przedmuchu, s

Wtedy impuls można określić zależnością:

$$I_{\tau} = \int_0^{\infty} \tau_{max} \cdot e^{-\frac{t}{T}} dt = \tau_{max} \cdot T \quad (20)$$

Zatem powiązanie τ_{max} z ciśnieniem uzyskujemy z następujących zależności:

$$\Delta V_{air} = k_Q \frac{I_{\tau}}{b} = k_Q \frac{\tau_{max} T}{b} \quad (21)$$

$$\tau_{max} \approx \Delta P_0 \cdot A_{ef} \cdot r_{ef} \quad (22)$$

$$\Delta V_{air} \approx k_Q \frac{\Delta P_0 \cdot A_{ef} \cdot r_{ef} \cdot T}{b} \quad (23)$$

Zakładając dla uproszczenia obliczeń model powiązany liniowo z nadciśnieniem, to przy k_p – jako współczynnika skalującym, otrzymujemy model:

$$\tau_{max} \approx k_p \cdot \Delta P_0 \quad (24)$$

gdzie:

$$\Delta V_{air} = k_Q \frac{k_p \Delta P_0 T}{b} = K \cdot \Delta P_0 \quad (25)$$

Przy czym współczynnik $K = k_Q \cdot \frac{k_p T}{b}$ jest parametrem, który można wyznaczyć eksperymentalnie (np. z prób przy różnych nadciśnieniach powietrza): na przykład dla kilku różnych poziomów sprężenia powietrza ΔP_0 przy czym $\Delta P = P_{robocze} - P_{atmosferyczne}$ (np. 0,5 bar, 1 bar, 1,5 bar nadciśnienia), a dla każdej wartości mierzymy faktyczną objętość wody V_{real} , odczyt z licznika V_{ind} , a z nich obliczamy $\Delta V_{air} = V_{ind} - V_{real}$. Dane liczbowe dopasowujemy do prostej $\Delta V_{air} \approx K \cdot \Delta P_0$ otrzymując empirycznie określony współczynnik K , czyli pośrednio kombinacje parametrów k_Q, k_p, T, b .

Zaletą otrzymanego modelu jest rdzeń fizyczny (moment od ciśnienia, impuls, hamowanie), a jednocześnie prostota statystyczna otrzymanego wzoru (liniowa zależność od ΔP_0) i możliwość bezpośredniego użycia do korekty odczytów (lub odnośnej argumentacji technicznej).

Sprawdzeniem uzyskanego modelu będzie określenie typowych rzędów wielkości dla małego licznika wirnikowego (DN15, DN20: jeden obrót wirnika \approx od 0,5 do 2 dm³). Efektywną powierzchnię działania powietrza na łopatkę wirnika A_{ef} oszacowano na podstawie typowych wymiarów wirnika wodomierza DN15 zgodnych z normą [10], traktując ją jako parametr efektywny obejmujący geometrię łopatek i lokalną strukturę przepływu.

Obliczamy:

$$k_Q \approx \frac{V_{na_obrót}}{2\pi} \Rightarrow (0,5 \div 2) \cdot 10^{-4} \text{ m}^3/\text{rad};$$

efektywne pole działania powietrza na łopatkę wirnika:

$$A_{ef} \approx 10^{-5} \div 10^{-4} \text{ m}^2;$$

efektywny promień: $r_{ef} \approx 5 \cdot 10^{-3} \div 1 \cdot 10^{-2} \text{ m}$,

$$k_p \approx A_{ef} r_{ef} \approx 10^{-8} \div 10^{-6} \text{ Nm}/\text{Pa};$$

$$T \approx 0,01 \div 0,3 \text{ s};$$

$$J \approx 10^{-7} \div 10^{-6} \text{ kg} \cdot \text{m}^2;$$

$$\tau_{mech} = \frac{J}{b} \approx 1 \div 5 \text{ (s)};$$

$$b = \frac{J}{\tau_{mech}} \approx 10^{-7} \div 10^{-6} \text{ Nms}.$$

Zakładając w przykładzie środkowe wartości empirycznych przedziałów, tzn.: $k_Q \approx 10^{-4} \text{ m}^3/\text{rad}$, $k_p \approx 10^{-7} \text{ Nm}/\text{Pa}$, $T \approx 0,05 \text{ s}$, $b \approx 5 \cdot 10^{-7} \text{ Nms}$, otrzymujemy:

$$K = k_Q \frac{k_p T}{b} \approx 10^{-4} \cdot \frac{10^{-7} \cdot 0,05}{5 \cdot 10^{-7}} \approx 10^{-6} \text{ m}^3/\text{Pa},$$

czyli orientacyjnie $K \approx 10^{-8} \div 10^{-6} \text{ m}^3/\text{Pa}$ przy proporcji $\Delta P_0 = 1 \text{ bar} = 10000 \text{ Pa}$, otrzymując wynik:

$$\Delta V_{air} \approx 10^{-8} \cdot 10^5 \div 10^{-6} \cdot 10^5 = 10^{-3} \div 10^{-1} \text{ m}^3 \Rightarrow$$

$V_{min_air} = 1 \div V_{max_air} = 100 \text{ dm}^3$ /każdy bar sprężonego powietrza w rurach.

Statyczny model uwzględniający tylko geometryczną różnicę w objętości sprężonego powietrza bez uwzględnienia rzeczywistego, nagłego udaru rozprężającego się korka powietrza prowadzącego do powstania dynamicznego impulsu na wirnik wodomierza, to model oparty jedynie na prawie Boyle’a, czyli $P_0 V_0 = P_1 V_1$: np. początkowa objętość poduszki na długości przewodu L i średnicy D :

$$V_0 = \frac{\pi D^2}{4} L \text{ po sprężeniu: } V_1 = V_0 \frac{P_0}{P_1}; \text{ różnica objętości}$$

(zmniejszenie podczas sprężania): $V_{BOYLE'A} = \Delta V =$

$$V_0 - V_1 = V_0 \left(1 - \frac{P_0}{P_1}\right); \text{ obliczenie: } D = 25 \text{ mm} = 0,025 \text{ m};$$

$L_{np} = 27 \text{ m}; V_0 = (0,025 \pi^2 / 4) \cdot 27 \approx 0,013 \text{ m}^3 = 13 \text{ dm}^3$; nato-

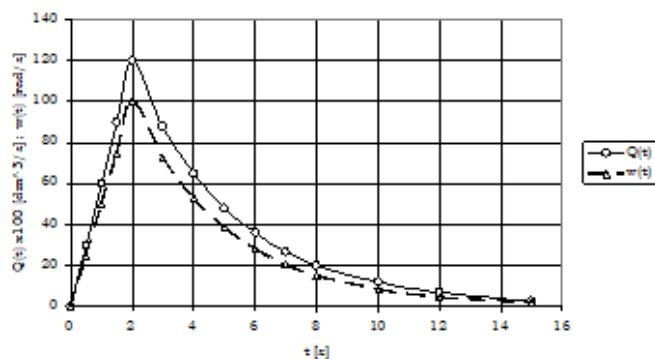
miast po sprężeniu: $V_1 = V_0 \frac{P_0}{P_1} \Rightarrow V_1 = 0,013/3 \approx 0,004 \text{ m}^3$;

$$V_{BOYLE'A} = \Delta V = V_0 - V_1 = V_0 \left(1 - \frac{P_0}{P_1}\right) \Rightarrow V_0 - V_1 = 0,013 - 0,004 = 0,009 \text{ m}^3 = 9 \text{ dm}^3$$

W modelu statycznym, opartym na geometrii układu i prawie Boyle’a, lecz nieuwzględniającym energetycznego efektu udaru sprężonego powietrza na wirnik, otrzymujemy wynik zaniżony, choć mieszczący się w zakresie wartości przewidywanych przez model dynamiczny: $V_{min_air} < V_{BOYLE'A} < V_{max_air}$. Model statyczny odtwarza jedynie początkową, najłagodniejszą fazę zjawiska: uzyskany wynik (≈ 9) mieści się w pierwszym dekanie odpowiedzi dynamicznej (1–100). Jest to konsekwencja braku uwzględnienia impulsu energetycznego związanego z rozprężaniem powietrza, który w modelu dynamicznym znacząco zwiększa amplitudę odpowiedzi.

Na rys. 1 przedstawiono wykres zależności w modelu pojedynczego impulsu przepływu $Q(t)$ w dm³/s oraz prędkości kątowej wirnika $\omega(t) = w(t)$ w rad/s. W celu umożliwienia ich wspólnej prezentacji na jednym wykresie wartości $Q(t)$ przeskalowano, mnożąc je przez 100. Widoczny jest gwałtowny impuls przepływu powoduje szybkie

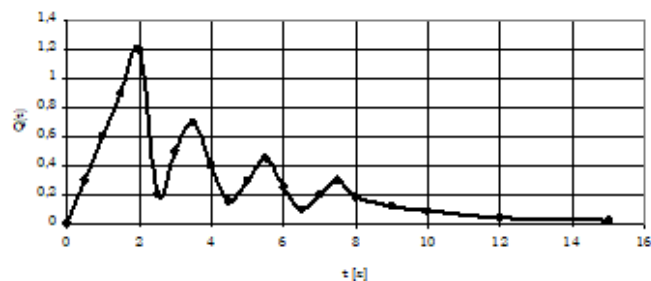
przyspieszenie wirnika, a jego ruch wygasa wolniej dzięki bezwładności, co prowadzi do dodatkowych obrotów i nadmiarowego wskazania wodomierza. W pierwszej fazie (0–2 s) obserwuje się gwałtowny wzrost przepływu, natomiast w fazie drugiej przepływ wygasa wykładniczo w wyniku zaniku energii sprężystej i stabilizacji warunków hydraulicznych.



Rys. 1. Porównanie przeskalowanego przepływu (pomnożonego przez 100 w celu umożliwienia wspólnej prezentacji na wykresie) z impulsem przepływu $Q(t)$ w dm^3/s oraz prędkością kątową wirnika $\omega(t) = w(t)$ w rad/s

Fig. 1. Comparison of the rescaled flow rate (multiplied by 100 to enable joint presentation on a single plot) with the flow impulse $Q(t)$ dm^3/s and the rotor angular velocity $\omega(t) = w(t)$ rad/s

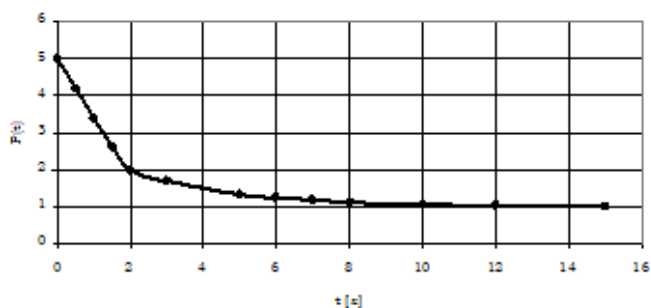
Rys. 2 przedstawia przykładową sekwencję impulsów przepływu $Q(t)$ w długim pionie instalacji wodociągowej po rozprężeniu rozciągniętej poduszki powietrznej. Widoczne są kolejne impulsy odpowiadające rozprężaniu lokalnych poduszek powietrza na niższych kondygnacjach oraz stopniowe wygaszanie zjawiska.



Rys. 2. Sekwencja impulsów przepływu $Q(t)$ w długim pionie instalacji wodociągowej po rozprężeniu rozciągniętej poduszki powietrznej

Fig. 2. Sequence of flow impulses $Q(t)$ in a long vertical riser of a water supply installation following the expansion of an elongated air pocket

Dla porównania na rys. 2 zamieszczono przebieg wieloimpulsowy $Q(t)$ ukazujący kolejne impulsy związane z rozprężaniem lokalnych poduszek powietrza na niższych kondygnacjach oraz stopniowe wygaszanie zjawiska. Na rysunku 3 przedstawiono przebieg zmian ciśnienia $P(t)$ podczas rozprężania poduszki powietrznej. Obserwuje się gwałtowny spadek ciśnienia w pierwszej fazie (0–2 s), natomiast w fazie drugiej następuje łagodne wygaszanie w kierunku ciśnienia statycznego instalacji.



Rys. 3. Ciśnienie $P(t)$: przykładowy przebieg ciśnienia w poduszce powietrznej podczas jej rozprężania

Fig. 3. Pressure $P(t)$: an example of the pressure evolution inside the air pocket during its expansion

8. Wnioski końcowe

Przeprowadzone studium przypadku jednoznacznie potwierdza, że obecność uwięzionej poduszki powietrznej w pionie instalacji wodociągowej może prowadzić do istotnych zaburzeń pracy wodomierza wirnikowego. Sprężone powietrze działa jak element sprężysty, zdolny do krótkotrwałego magazynowania energii i jej gwałtownego uwalniania podczas pierwszego otwarcia przepływu. W efekcie powstaje impuls przepływu o intensywności znacznie przekraczającej wartości nominalne, co prowadzi do dynamicznego rozpędzenia wirnika i rejestracji dodatkowych obrotów niewspółmiernych do rzeczywistej objętości przepływającej wody.

Zjawisko to jest szczególnie wyraźne w budynkach wielokondygnacyjnych, gdzie prace instalacyjne na niższych kondygnacjach mogą powodować powstanie rozciągniętej poduszki powietrznej, generującej sekwencję impulsów przepływu trwającą nawet 10–15 s. W takich warunkach nadmierowe wskazania wodomierza mogą osiągać rząd $1\text{--}100 \text{ dm}^3$, mimo że rzeczywista ilość przepływającej wody pozostaje niewielka.

Wyniki analizy wskazują, że zjawiska nieustalone związane z przepływem mieszaniny ciecz–gaz powinny być uwzględniane zarówno na etapie projektowania, jak i eksploatacji instalacji wodociągowych. Szczególnie znaczenie ma staranne odpowietrzanie przewodów po pracach serwisowych oraz świadomość, że błędy pomiarowe wodomierzy wirnikowych mogą wynikać nie z wad urządzenia, lecz z dynamicznych efektów przepływu wywołanych obecnością sprężonego powietrza.

Przedstawione studium przypadku podkreśla potrzebę dalszych badań nad wpływem przepływów impulsowych na dokładność wodomierzy wirnikowych oraz nad metodami ograniczania skutków uwięzionego powietrza w instalacjach. Uzyskane wyniki mogą stanowić podstawę do opracowania wytycznych eksploatacyjnych i procedur serwisowych, które pozwolą zminimalizować ryzyko występowania podobnych zjawisk w praktyce.

9. Bibliografia

- [1] Bergant, Anton, Arris S. Tijsseling, Young-il Kim, Uroš Ka-

- radzić, Ling Zhou, Martin F. Lambert, and Angus R. Simpson. (2018). Unsteady pressures influenced by trapped air pockets in water-filled pipelines. *Journal of Mechanical Engineering*, 64(6), 351–362, <https://doi.org/10.5545/sv-jme.2018.5238>
- [2] Zhou, Ling, Huan Wang, Bryan Karney, Deyou Liu, Pei Wang, and Su Guo. (2018). Dynamic Behavior of Entrapped Air Pocket in a Water Filling Pipeline. *Journal of Hydraulic Engineering*, 144(8), 04018036. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HY.1943-7900.0001491](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0001491)
- [3] Ferreira, J.P., Buttarazzi, N., Ferras, D., & Covas, D.I.C. (2021). Effect of an entrapped air pocket on hydraulic transients in pressurized pipes. *Journal of Hydraulic Research*, 59(6), 1018–1030. <https://doi.org/10.1080/00221686.2020.1862323>
- [4] Malesińska A., Knap L., Kubrak M., Kodura A. (2025). Experimental Analysis of Changes in the Behavior of a Trapped Air Pocket in a Blind Section of a Rapidly Filling Water Pipe. *ISH Journal of Hydraulic Engineering*, 31 (3), 497–513. <https://doi.org/10.1080/09715010.2025.2486482>
- [5] PozosEstrada O. (2025). Influence of entrapped air on hydraulic transients during rapid closure of a valve located upstream and downstream of an air pocket in pressurized pipes. *Water*, 17 (7), 927. <https://doi.org/10.3390/w17070927>
- [6] Dixon, S. L., Hall C. (2014). Fluid mechanics and thermodynamics of turbomachinery. 7th ed. Oxford: Elsevier.
- [7] Lynnworth, L. C. (2005). Flow measurement handbook: industrial designs, operating principles, performance, and applications. Burlington, MA: Academic Press.
- [8] White F. M. (2011). Fluid mechanics. 7th ed. New York: McGraw-Hill.
- [9] Gülich J. F. (2010). Centrifugal pumps. 2nd ed. Berlin: Springer.
- [10] Polski Komitet Normalizacyjny. PN-EN ISO 4064-1:2025-08. Water meters for cold drinking water and hot water – Part 1: Metrological and technical requirements [Wodomierze do wody zimnej pitnej i wody gorącej – Część 1: Wymagania metrologiczne i techniczne]. Warszawa: PKN, 2025.

NASZ PATRONAT MEDIALNY

BioDay 2026 technologie biogazu i biometanu w nowoczesnych systemach energetycznych

6 marca 2026 r. na Wydziale Inżynierii Środowiska Politechniki Warszawskiej odbyło się międzynarodowe wydarzenie „BioDay 2026” poświęcone roli biogazu i biometanu w nowoczesnych systemach energetycznych oraz warunków technologicznych i ekonomicznych ich rozwoju. W wydarzeniu uczestniczyli przedstawiciele sektora gazowego z Polski i Danii oraz pracownicy naukowcy i studenci wydziału. Patronat nad wydarzeniem objęła Ambasada Królestwa Danii w Warszawie oraz nasze czasopismo.

Duński przykład w transformacji gazowej

Istotnym elementem spotkania była prezentacja duńskich doświadczeń związanych z rozwojem sektora biogazu i biometanu. Dania od wielu lat konsekwentnie realizuje strategię odchodzenia od paliw kopalnych, rozwijając odnawialne źródła energii oraz technologie umożliwiające produkcję i wykorzystanie biometanu. Dzięki stabilnemu systemowi wsparcia oraz skutecznym regulacjom kraj ten osiągnął jeden z najwyższych udziałów biometanu w krajowym systemie gazowym w Europie. Zaprezentowane rozwiązania stanowiły punkt wyjścia do dyskusji nad możliwościami rozwoju tego sektora w Polsce.

Technologie uszlachetniania biogazu i nowe kierunki jego wykorzystania

Podczas wydarzenia omówiono również technologie umożliwiające oczyszczanie biogazu oraz wyzwania związane z wdrażaniem instalacji biometanowych. Szczególną uwagę poświęcono metodom uszlachetniania biogazu, w tym technologii absorpcji aminowej, która umożliwia uzyskanie biometanu o wysokiej zawartości metanu, spełniającego wymagania sieci dystrybucyjnych.

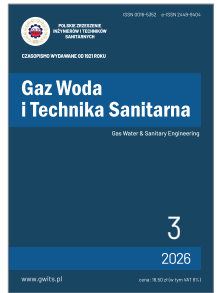
Zmiana modelu wykorzystania biogazu

W trakcie dyskusji podkreślono zmianę modelu wykorzystania biogazu. Coraz częściej odchodzi się od jego bezpośredniego spalania w jednostkach kogeneracyjnych zlokalizowanych przy biogazowniach na rzecz oczyszczania biogazu i wprowadzania go do sieci. Takie rozwiązanie zwiększa elastyczność wykorzystania paliwa, umożliwia jego magazynowanie i transport, a także pozwala na szersze zastosowanie w energetyce, przemyśle oraz transporcie.



BioDay stworzył przestrzeń do wymiany wiedzy i doświadczeń między środowiskiem akademickim a branżą energetyczną. Spotkanie pokazało, że rozwój technologii biometanowych może odegrać istotną rolę w transformacji energetycznej, przyczyniając się zarówno do ograniczenia emisji gazów cieplarnianych, jak i zwiększenia bezpieczeństwa energetycznego.

Wydarzenie zostało zorganizowane przez Wydział Inżynierii Środowiska PW we współpracy z partnerami branżowymi.



PFASs jako przykład antropogenicznych, szkodliwych związków chemicznych obecnych w ściekach komunalnych

PFASs as an example of anthropogenic, harmful chemical compounds present in municipal wastewater

Bartosz Wadiak¹ , Joanna Czarnota^{2*} , Adam Masłoń² 

¹ Szkoła Doktorska Politechniki Rzeszowskiej

² Wydział Budownictwa, Inżynierii Środowiska i Architektury, Politechnika Rzeszowska

* Kontakt / Correspondence: askalucz@prz.edu.pl

Streszczenie:

Poli- lub perfluorowane substancje alkilowane (z ang. per- and polyfluoroalkyl substances, PFASs) to szeroka grupa związków chemicznych, syntezowana chemicznie od lat czterdziestych ubiegłego stulecia, która znalazła szerokie zastosowanie w życiu codziennym człowieka oraz różnych gałęziach przemysłu. Inertność implikuje trwałość cząsteczek tej grupy zanieczyszczeń, co prowadzi do ich akumulacji w środowisku oraz obecności w wielu obszarach związanych z codziennym funkcjonowaniem człowieka, np. w ściekach komunalnych. Badania na przestrzeni lat wykazały wysoką toksyczność PFASs dla organizmów żywych oraz trudności w ich usuwaniu. W pracy przedstawiono charakterystykę PFASs, ich wpływ na organizmy żywe, sposoby analizy jakościowej i ilościowej tych związków, a także zwrócono uwagę na ich występowanie w ściekach komunalnych.

Słowa kluczowe: PFASs, ścieki komunalne, skażenie środowiska, oddziaływanie na człowieka

Abstract:

Poly- or perfluoroalkyl substances (PFASs) are a broad group of chemical compounds, chemically synthesized since the 1940s, which have found wide application in everyday human life as well as in various branches of industry. Their inertness implies the persistence of molecules in this group of pollutants, leading to their accumulation in the environment and presence in many areas, including municipal wastewater. Research over the years has demonstrated the high toxicity of PFASs to living organisms and the difficulties associated with their removal. This paper presents the characteristics of PFASs, their impact on living organisms, methods for qualitative and quantitative analysis of these compounds, and emphasizes their occurrence in municipal wastewater.

Keywords: PFASs, municipal wastewater, environmental contamination, impact on humans

1. Wprowadzenie

PFASs to grupa antropogenicznych związków chemicznych, do których zalicza się związki perfluoroalkilowe oraz polifluoroalkilowe. Skrótowiec pochodzi z języka angielskiego i oznacza *per-* oraz *polyfluoroalkyl substances*, a także *perfluorinated alkylated substances*. Są to substancje niewystępujące naturalnie, syntezowane sztucznie od lat czterdziestych XX wieku [25]. PFASs dzielą się na wiele podkategorii, z których każda wyróżnia się obecnością odmiennych grup funkcyjnych lub atomów. W każdej podkategorii wyróżniamy cząsteczki o różnej długości oraz izomerii. Istnieje możliwość przekształcenia danego związku chemicznego w inny należący już do innej podgrupy. Cechą wspólną

jest łańcuch alkiłowy zawierający co najmniej jeden atom węgla, w którym wszystkie atomy wodoru podmienia się na atomy fluoru, co prowadzi do tego, że posiadają one co najmniej jedną grupę perfluoroalkilową C_nF_{2n+1} [40].

Substancje per- i polifluoroalkilowe (PFASs), określane w przeszłości mianem związków perfluorowanych, należą do grupy syntetycznych chemikaliów wykrywanych niemal we wszystkich próbkach środowiskowych z różnych obszarów geograficznych świata, w tym również z terenów wolnych od ich produkcji i zastosowania. Narażenie na PFAS poprzez spożycie zanieczyszczonej wody pitnej jest powszechnie obserwowane w Stanach Zjednoczonych oraz prawdopodobnie występuje globalnie, zwłaszcza w populacjach zamieszkujących tereny sąsiadujące z obszarami

o znacznym skażeniu gleby i wód gruntowych tymi związkami. Ponadto uważa się, że dieta stanowi główne źródło ekspozycji na PFASs. Zgodnie z oceną Europejskiego Urzędu ds. Bezpieczeństwa Żywności (EFSA), dla większości populacji to właśnie żywność jest dominującą drogą narażenia, przy czym istotny udział mają ryby, mięso, owoce oraz jaja. Dodatkowo, inhalacja kurzu zawierającego PFASs, pochodzącego z powszechnie stosowanych produktów konsumenckich, a także bezpośredni i pośredni kontakt z wyrobami zawierającymi te substancje, również przyczyniają się do całkowitego poziomu narażenia na PFAS [4, 20].

2. Właściwości fizykochemiczne oraz zastosowanie PFASs

Zidentyfikowano ponad 5 000 różnych związków chemicznych zaliczanych do PFASs, a 256 z nich jest produkowanych w ilościach, które są znaczące na poziomie handlowym w skali światowej. Substancje te cenione są za ich stabilność termiczną oraz chemiczną, inertność, hydrofobowość, oleofobowość [49]. Substancje per- i polifluoroalkilowe PFASs stanowią szeroką klasę syntetycznych chemikaliów, które zawierają co najmniej jedną grupę perfluoroalkilową, w której wszystkie atomy wodoru przy atomie węgla zostały zastąpione przez fluor [5, 7, 11]. Wysoka

wartość elektroujemności atomu fluoru obecnego w tej grupie zanieczyszczeń powoduje silną polaryzację wiązania węgiel – fluor. Dodatkowo, mały rozmiar atomu tego pierwiastka nadaje grupie perfluoroalkilowej wzmocnione właściwości chemiczne, takie jak większa kwasowość, stabilność, duża aktywność powierzchniowa przy niskich stężeniach oraz odporność na związki hydrofobowe oraz hydrofilowe w porównaniu do ich węglowodorowych odpowiedników [49].

Cechy te pozwoliły na znalezienie zastosowania PFASs w wielu gałęziach przemysłu, szczególnie w procesach wykorzystujących wysokie temperatury i/lub ciśnienie oraz środowisko korozyjne, ale z drugiej strony powodują one ich odporność na degradację, co prowadzi do ich kumulacji w środowisku oraz organizmach zwierząt oraz ludzi. Niektóre związki chemiczne z grupy PFASs mogą ulegać częściowej degradacji, zarówno w środowisku naturalnym jak i w organizmach żywych, jednak produktami końcowymi tych reakcji są stabilne cząsteczki takie jak: PFCAs (ang. *Perfluorocarboxylic acids*) kwasy perfluorokarboksyłowe, PFSAs (ang. *Perfluorosulfonic acids*) kwasy perfluoroalkilosulfonowe, PFECAs (ang. *Perfluoroether carboxylic acids*) kwasy perfluoroeterokarboksyłowe oraz PFESAs (ang. *Perfluoroether sulfonic acids*) kwasy perfluoroeterosulfonowe (Tabela 1).

Tabela 1. Przykładowe produkty końcowe reakcji degradacji PFASs w środowisku naturalnym oraz organizmach żywych (opracowanie własne na podstawie [27, 30, 33, 49, 51])

Table 1. Examples of end products of PFAS degradation reactions in the natural environment and living organisms (own study based on [27, 30, 33, 49, 51])

| | | PFASs (C _n F _{2n+1} –) | | | | | | |
|---|--|---|---|---|--|---|----------------|-------|
| | | PFAAs | | | Prekursory PFAA | | Pozostałe | |
| I | II | III | IV | V | VI | VII | VIII | IX |
| PFCAs C _n F _{2n+1} – COOH | PFSAs C _n F _{2n+1} – SO ₃ H | PFPAs C _n F _{2n+1} – PO ₃ H ₂ | PFPIAs C _n F _{2n+1} – PO ₂ H – C _m F _{2m+1} | PFECAs oraz PFE- SAs C _n F _{2n+1} – O – C _m F _{2m+1} – R | Związki oparte o PASF C _n F _{2n+1} – SO ₂ – R | Związki oparte na substancjach fluorotelomerowych C _n F _{2n+1} – C ₂ H ₄ – R | Fluoropolimery | PFPEs |
| PFBA | PFBS | PFBPA | C ₄ /C ₄ PFPIA (n,m=4) | ADONA | MeFBSA | 4:2 FTOH (n=4, R = OH) | PTFE | - |
| PFPeA | PFHxS | PFHxPA | GenX | MeFOSA | 6:2 FTOH (n=6, R = OH) | PVDF | | |
| PFHxA | PFOS | PFOPA | C ₆ /C ₆ PFPIA (n,m=6) | EEA | EtFBSA | 8:2 FTOH (n=8, R = OH) | FEP | |
| PFOA | PFDS | PFDPa | F – 53B | EtFOSA | 10:2 FTOH (n=10, R = OH) | PFA | | |
| PFNA | | | C ₈ /C ₈ PFPIA (n,m=8) | SAmPAP | 12:2 FTOH (n=12, R = OH) | | | |
| | | | C ₆ /C ₈ PFPIA (n=6, m=8) | | | | | |

KOLUMNIA I: PFCAs (ang. *Perfluorocarboxylic acids*) kwasy perfluorokarboksyłowe, PFBA (ang. *Perfluorobutanoic acid*) kwas perfluorobutanowy, PFPeA (ang. *Perfluoropentanoic acid*) kwas perfluoropentanowy, PFHxA (ang. *Perfluorohexanoic acid*) kwas perfluoroheksanowy, PFOA (ang. *Perfluorooctanoic acid*) kwas perfluorooktanowy, PFNA (ang. *Perfluorononanoic acid*) kwas perfluorononanowy.

KOLUMNIA II: PFSAs (ang. *Perfluorosulfonic acids*) kwasy perfluoroalkilosulfonowe, PFBS (ang. *Perfluorobutanesulfonic acid*) kwas perfluorobutanosulfonowy, PFHxS (ang. *Perfluorohexanesulfonic acid*) kwas perfluoroheksanosulfonowy, PFOS (ang. *Perfluorooctanesulfonic acid*) kwas perfluorooktanosulfonowy, PFDS (ang. *Perfluorodecenesulfonic acid*) kwas perfluorodekanosulfonowy.

KOLUMNIA III: PFPAs (ang. *Perfluoroalkyl phosphonic acids*) kwasy perfluoroalkilofosfonowe, PFBPA (ang. *Perfluorobutylphosphonic acid*) kwas perfluorobutylofosfonowy, PFHxPA (ang. *Perfluorohexylphosphonic acid*) kwas perfluoroheksylofosfonowy, PFOPA (ang. *Perfluorooctylphosphonic acid*) kwas perfluorooktylofosfonowy, PFDPa (ang. *Perfluorodecylphosphonic acid*) kwas perfluorodecylofosfonowy.

KOLUMNIA IV: PFPIAs (ang. *Perfluoroalkyl phosphinic acids*) kwasy perfluoroalkilofosfinowe, C₄/C₄ PFPIA (ang. *Bis(perfluorobutyl) phosphinic acid*) kwas bis(perfluorobutylo)fosfinowy, C₆/C₆ PFPIA (ang. *Bis(perfluorohexyl) phosphinic acid*) kwas bis(perfluoroheksylo)fosfinowy, C₈/C₈ PFPIA (ang. *Bis(perfluorooktylo) phosphinic acid*) kwas bis(perfluorooktylo)fosfinowy, C₆/C₈ PFPIA (ang. *(Perfluorohexyl)(Perfluorooktylo) phosphinic acid*) kwas (perfluoroheksylo)(perfluorooktylo)fosfinowy.

KOLUMNIA V: PFECAs (ang. *Perfluoroalkylether carboxylic acids*) kwasy perfluoroeterokarboksyłowe, PFESAs (ang. *Perfluoroalkylether Sulfonic Acids*) kwasy perfluoroeterosulfonowe, ADONA (ang. *Ammonium 4,8-dioxa-3H-perfluoronanoate*) 4,8-dioksa-3H-perfluoronanian amonu, GenX (ang. *Hexafluoropropylene oxide dimer acid*) kwas dimeru tienku heksafluoropropylenu, EEA (ang. *Ethoxyperfluoroethanesulfonic acid*) kwas etoksyperfluoroetanosulfonowy, F-53B (ang. *6:2 chlorinated polyfluorinated ether sulfonate*) 6:2 chlorowany polifluorowany eterosulfonian.

KOLUMNIA VI: MeFBSA (ang. *N-methylperfluorobutane sulfonamide*) N-metyloperfluorobutanosulfonamid, MeFOSA (ang. *N-methylperfluorooctane sulfonamide*) N-metyloperfluorooktanosulfonamid, EtFBSA (ang. *N-ethylperfluorobutane sulfonamide*) N-etyloperfluorobutanosulfonamid, EtFOSA (ang. *N-ethylperfluorooctane sulfonamide*) N-etyloperfluorooktanosulfonamid, SAmPAP (ang. *Sulfonamide perfluoroalkoxy phosphonate diester*) diester fosforanowy perfluoroalkoetylu.

KOLUMNIA VII: FTOH (ang. *Fluorotelomer alcohol*) alkohol fluorotelomerowy (np. 4:2, 6:2, 8:2, 10:2, 12:2).

KOLUMNIA VIII: PTFE (ang. *Polytetrafluoroethylene*) politetrafluoroetylen, PVDF (ang. *Polyvinylidene fluoride*) poliwęgiel winylidenu, FEP (ang. *Fluorinated ethylene propylene*) fluorowany etylenopropylen, PFA (ang. *Perfluoroalkoxy alkanes*) perfluoroalkoksyalkany.

KOLUMNIA IX: PFPEs (ang. *Perfluoropolyethers*) perfluoropolietery.

Związki z grupy PFASs wykazują pożądane właściwości użytkowe oraz łatwość produkcji, dlatego wiele firm na przestrzeni lat opracowało całą gamę różnych cząsteczek, które znalazły szerokie zastosowanie zarówno w produktach codziennego użytku jak i w przemyśle (Tabela 2) [49].

Tabela 2. Gałęzie przemysłu oraz produkty, do wytwarzania których wykorzystywane są PFASs [9, 10, 15, 26]

Table 2. Industries and products for which PFASs are used [9, 10, 15, 26]

| Przemysł | Wytwarzane produkty |
|---------------|--|
| Budowlany | kleje, kafelki, poszycia dachowe, filtry powietrza |
| Chemiczny | woski, farby, lakiery, tusze, powłoki przeciwmgielne, materiały wybuchowe, materiały miotające, amunicja, pianki gaśnicze |
| Kosmetyczny | emulgatory, środki oleofobowe, środki nawilżające (składnik kosmetyków pełniący funkcję emulgatorów, środków nawilżających lub oleofobowych) |
| Elektroniczny | telefony komórkowe, dyski komputerowe, kamery cyfrowe, drukarki, radary, kable, baterie litowe i cynkowe |
| Medyczny | soczewki kontaktowe, kaniule, igły, stenty, endoprotezy, pościel chirurgiczna |
| Spożywczy | opakowania papierowe |

Przykładowo, analizy chemiczne preparatów kosmetycznych przeprowadzone przez Duńską Agencję Ochrony Środowiska wykazały, że zawierają one w swoim składzie PFAS. Najwyższe stężenie pojedynczego związku należało do PFHxA i wynosiło 3 340 ng/g, a całkowite stężenie wszystkich związków z grupy PFASs wynosiło 10 700 ng/g [47].

3. Źródła, występowanie i rozkład PFASs w środowisku naturalnym oraz ich wpływ na organizm człowieka

Inertność, trwałość, stabilność i siła wiązania C – F powodują, że zarządzanie i kontrolowanie obecności w powietrzu, wodzie i glebie związków chemicznych z grupy PFASs jest trudne. Ich występowanie w elementach środowiska naturalnego jest bardzo zróżnicowane i zależy między innymi od budowy chemicznej, przykładowo izomery rozgałęzione wykazują większe powinowactwo do środowiska wodnego, natomiast cząsteczki liniowe są częściej odnajdywane w glebie [45]. Transport atmosferyczny odgrywa kluczową rolę w globalnej dystrybucji. Należy zaznaczyć, że po uwolnieniu do środowiska, wykorzystując procesy wymywania, wytrącania, podziału i rozkładu, PFASs mogą być przenoszone na duże odległości i dlatego znajdują się w różnych środowiskach naturalnych na całym świecie. Przykładowo, szybkość rozkładu PFASs zależy od dostępności tlenu, w warunkach beztlenowych i w osadach morskich jest odmienna niż w glebach z obecnością tlenu, czego konsekwencją jest znaczna zmienność w możliwościach biotransformacji, co powoduje odmienny rozkład stężeń przy porównywaniu takich miejsc jak składowiska odpadów, oceany lub gleby. Jednak mobilność tych związków w warunkach lądowych zmniejsza się wraz ze wzrostem masy cząsteczkowej przy jednoczesnym wzroście bioakumulacji [38, 46, 47]. Na rysunku 1 przedstawiono obieg związków PFASs w środowisku oraz skutki ich występowania w poszczególnych obszarach.

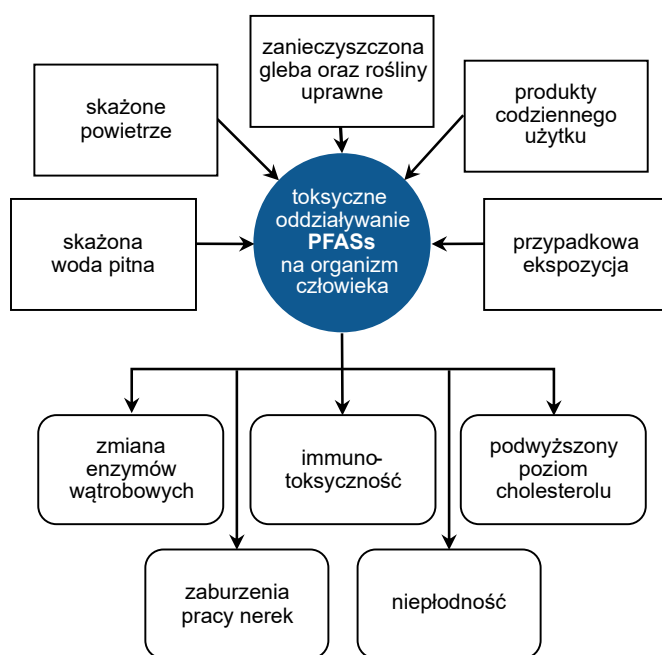


Rys. 1. Obieg związków PFASs w środowisku (opracowanie własne na podstawie [45])

Fig. 1. Circulation of PFAS compounds in the environment (own study based on [45])

Dotychczasowe badania pokazują, że głównym źródłem PFASs w środowisku są odcieki ze składowisk odpadów (stężenie od 1 do 100 ng/dm³) oraz aerozole (stężenie od 10 do 100 pg/m³) [45]. Z kolei badania ryb słodkowodnych przeprowadzone przez Amerykańską Agencję Ochrony Środowiska (ang. *Environmental Protection Agency* (US EPA)) w latach 2013–2015 wykazały, że mediana stężenia PFAS wynosiła 11 800 ng/kg [47].

Okres półtrwania niektórych związków z grupy PFASs może wynosić kilkanaście lat, a akumulacja tych zanieczyszczeń w organizmie człowieka może prowadzić do poważnych schorzeń, takich jak zaburzenie pracy układu immunologicznego, choroby nowotworowe czy upośledzona płodność [18, 45]. Związki te zaliczane są do „wiecznych chemikaliów” [40]. Badania surowicy krwi ludzkiej wykazały, że stężenia PFASs w tym przypadku mogą dochodzić do setek µg/dm³. Niestety, z powodu ich powszechnego stosowania i inertnej natury, PFASs występują obecnie we krwi ludzi na całym świecie [3]. Raport „Centers for Disease Control and Prevention” z 2022 roku opracowany przez Amerykańską Agencję Rządową podaje, że PFASs obecne są u 98% Amerykanów [26, 38, 46]. Należy wskazać, że oddziaływanie PFASs na człowieka ma wiele źródeł środowiskowych [16, 17, 35, 39, 46]. Powietrze jest głównie zanieczyszczane przez produkcję polimerów fluorowych, ubrań, farb, opakowań spożywczych, materiałów budowlanych, środków gaśniczych. Dodatkowo oddziaływanie pochodzi z preparatów kosmetycznych oraz przedmiotów codziennego użytku [35, 49]. Źródło skażenia wód oraz gleby to oczyszczalnie ścieków, a dokładnie osady ściekowe wykorzystywane w rolnictwie [50]. Wpływy PFASs na organizm człowieka jest nieunikniony i może powodować wiele poważnych problemów zdrowotnych (Rys. 2).



Rys. 2. Kierunki oddziaływania oraz wpływ PFAS na organizm człowieka (opracowanie własne na podstawie [3, 23, 37])

Fig. 2. Directions of influence and impact of PFAS on the human body (own study based on [3, 23, 37])

Negatywny wpływ PFAS na zdrowie człowieka zależy od sposobu jego narażenia na czynnik szkodliwy, np. poprzez żywność (mleko, warzywa, owoce, zboża), zanieczyszczone powietrze czy też produkty użytku codziennego. Znaczenie mają również czas ekspozycji, natężenie oraz droga dostania się związków zanieczyszczających do organizmu. Istotne są również predyspozycje indywidualne, wiek, płeć, rasa, podatność genetyczna oraz ogólny stan zdrowia. To wszystko ma znaczenie pod kątem potencjalnych negatywnych skutków [3, 37, 40].

Biorąc pod uwagę trwałość PFASs, ich szerokie zastosowanie, wszechobecność w środowisku naturalnym i potencjalną toksyczność, od końca lat dziewięćdziesiątych ubiegłego stulecia, po ponad pięćdziesięcioletniej produkcji, zaczęto zwracać szczególną uwagę na długołańcuchowe PFASs, czyli związki, które mają, co najmniej 8 grup perfluoroalkilowych oraz ich prekursorów [47]. Dłuższe cząsteczki wykazują większą zdolność do bioakumulacji niż ich krótkołańcuchowe odpowiedniki [13, 44, 52]. Z drugiej strony, mniejsze cząsteczki są bardziej mobilne i łatwiej dyfundują, szczególnie w glebie. Zainteresowanie tym aspektem wykazywali naukowcy, organy kontrolne oraz opinia publiczna. Analizowano i szczegółowo badano kwas perfluorooktanowy PFOA ($C_7F_{15}COOH$) oraz kwas heptadekafluorooktano-1-sulfonowy PFOS ($C_8F_{17}SO_3H$) pod kątem ich wpływu na organizmy żywe [52]. Rezultatem tych badań jest wpisanie PFOS i jego prekursorów do wykazu Konwencji Sztokholmskiej w sprawie trwałych zanieczyszczeń organicznych, natomiast PFOA i jego prekursorów są obecnie oceniane pod kątem ich wpisania. Unia Europejska zakazała stosowania PFOS od 2006 roku, natomiast PFOA od 2019 roku. Oprócz tego podjęto wiele inicjatyw regulacyjnych na poziomie regionalnym i/lub krajowym mających na celu regulację PFOS, PFOA i/lub niektórych innych PFAS, głównie w krajach

rozwinętych [12, 43].

Z powodu wprowadzanych regulacji prawnych zakazujących stosowania niektórych związków z grupy PFASs (na przykład wytyczne US EPA dotyczące wody pitnej dla PFOA i PFOS: 70 ng/dm^3), poszukuje się zamienników o zbliżonych właściwościach, ale mniej toksycznych. Zainteresowanie wykazuje się cząsteczkami o krótszych łańcuchach lub takimi, w których tylko część atomów wodoru została podmieniona atomami fluoru. Ich zwiększona mobilność powoduje, że są odnajdywane we wszystkich ekosystemach i potencjalnie mogą również stanowić zagrożenie toksykologiczne dla ekosystemu oraz organizmów żywych [45].

Część produktów wprowadzanych do obrotu może stanowić niezamierzone źródła innych związków należących do PFASs będących zanieczyszczeniem. Place i Field [34] zidentyfikowali 10 podkategorii PFASs występujących w składzie pianek gaśniczych. Brak wymiany informacji pomiędzy użytkownikami a producentami nie pozwala jednoznacznie stwierdzić, czy występowanie tych cząsteczek to zamierzony efekt wynikający z procesu produkcyjnego, czy resztkowy produkt pośredni i/lub końcowy, czy może produkt rozkładu [34].

Wszechobecność PFASs ujawnia się w gospodarce wodnej, gdzie ich obecność stwierdza się w wodach powierzchniowych, gruntowych, przybrzeżnych oraz w zbiornikach wodnych. Pojawia się coraz więcej doniesień naukowych, w których naukowcy wykazują wysokie stężenia, dochodzące do 100 ng/dm^3 , konwencjonalnych PFASs w ściekach. Badania prowadzone są nierównomiernie, najwięcej opracowań podchodzi z Chin (31%), Europy (30%) oraz Ameryki Północnej (16%), natomiast analizy z pozostałych obszarów geograficznych są bardzo nieliczne [40]. Do tej pory analizowano stężenia bardzo wąskiej grupy przedstawicieli PFASs, głównie PFOS i PFOA – z powodu najdłuższego ich stosowania wbrew temu, że obecnie ich produkcja gwałtownie i znacząco spada. Mimo to obecność tych cząsteczek wykryto w ponad 70% matryc ujętych w dotychczasowych badaniach [46].

Najnowsza literatura sugeruje, że PFAS o krótszych łańcuchach mogą zachowywać się podobnie pod względem trwałości i bioakumulacji jak ich odpowiedniki o dłuższych łańcuchach i mogą być równie niebezpieczne, co zaobserwowano w eksperymentach na zwierzętach. Względny brak informacji na temat poziomów krótkich i ultrakrótkołańcuchowych PFAS w ściekach jest szczególnie niepokojący, ponieważ zapotrzebowanie na krótkie łańcuchy PFAS, szczególnie w krajach rozwijających się, prawdopodobnie zwiększy ich uwalnianie do środowiska w nadchodzących latach [47].

Do tej pory przeprowadzone badania wykazały, że najczęściej występującymi związkami w ściekach są:

- PFAS ze stężeniem od 0 do 761 ng/dm^3 ,
- PFAA ze stężeniem $81 \pm 25 \text{ ng/dm}^3$,
- PFCA ze stężeniem od 20 do 930 ng/dm^3 ,
- PFSA ze stężeniem od 5 do 490 ng/dm^3 [47].

Generuje to nowe wyzwania dla przedsiębiorstw wodociągowych, które w dobie zmieniających się regulacji prawnych będą musiały zmierzyć się z koniecznością usuwania PFASs, zarówno podczas procesów uzdatniania wody jak i oczyszczania ścieków komunalnych.

4. Analiza chemiczna oraz usuwanie PFAS

Degradacja związków krótkołańcuchowych jest trudna i wymaga dalszych badań naukowych, aby skutecznie usunąć je ze środowiska. W odpowiedzi na zwiększony nacisk na usuwanie zanieczyszczeń PFAS na poziomach od części na miliard (ppb) do części na bilion (ppt) opracowano kilka technik usuwania PFAS [21]. Skuteczność metod usuwania tych substancji zależy od rodzaju związków (istotna jest ich budowa chemiczna). Należą do nich:

- Metody niszczące: obejmujące spalanie, utlenianie elektrochemiczne, zaawansowane utlenianie/redukcję, fotolizę sonochemiczną i biodegradację. Spośród nich główną rolę odgrywa sonifikacja. Fale dźwiękowe tworzą pęcherzyki, które rozszerzają się, aż osiągną etap quasi-adiabaticznej kompresji, po czym zapadają się. Ta procedura nie jest opłacalna, więc nie została jeszcze przeniesiona do zastosowania przemysłowego, jednak jako początkowa technika na skalę pilotażową i laboratoryjną, została wspomniana w artykułach naukowych przez Vo i in. [46] oraz Verma i in. [45]. Prawie wszystkie procedury niszczące obejmują defluorowanie, co często skutkuje niepożądanym produktem ubocznym krótkołańcuchowego PFAS syntetyzowanym podczas rozpadu [26, 28, 44].
- Metody nieniszczące: obejmujące węgiel aktywny, żywice jonowymienne, adsorbenty polimerowe, frakcjonowanie piany in situ lub ozofrakcjonowanie. Metoda pierwsza oraz druga są stosowane najczęściej. Węgiel aktywny ze względów ekonomicznych oraz wydajnościowych stosowany jest głównie do długołańcuchowych PFAS z powodu ich natury hydrofobowej. Należy pamiętać, że zdolność adsorpcji zależy m.in. od średnic porów, powierzchni aktywnej czy ładunku powierzchniowego [47]. W przeciwieństwie do węgla aktywnego żywice jonowymienne mogą być stosowane wielokrotnie. Z tego powodu materiał filtrujący może być wykorzystany wielokrotnie bez jego wymiany, a załadowany w taki sposób PFAS może zostać kolejno zmineralizowany i skutecznie usunięty [40]. Metody nieniszczące usuwają jednak związki PFASs chwilowo [47].

Optymalizacja wymienionych powyżej procesów polega na modyfikowaniu warunków procesowych, tj.: stężenia substratów oraz zawiesin ogólnych, natężenia przepływu, temperatury, czasu zatrzymania [47].

Określanie zawartości PFASs zarówno w środowisku, organizmach żywych, jak i innych matrycach jest kluczowe. Służą do tego techniki analityczne, które muszą zostać opracowane w taki sposób, aby zapewnić odpowiedni poziom czułości, selektywności i specyficzności. Brak dostępności standardów analitycznych do oceny ilościowej, niskie odzyskiwanie ekstrakcji, zanieczyszczenia próbek kontrolnych oraz niska czułość przyrządów utrudniają analizę PFAS [29].

Istotny jest właściwy dobór techniki pod kątem analizowanej matrycy. Dla gleby stosuje się LC-QTOF-MS, a dla wód gruntowych LC/MS-MS w trybach jonizacji elektrosprejem negatywnej (ESI-) i pozytywnej (ESI+) [1].

Najbardziej powszechną jest chromatografia cieczowa sprzężona ze spektrometrią mas LC – MS/MS, która pozwala na ilościowe oznaczanie z niskimi poziomami wykrywalności na poziomie ppt [50]. Biorąc pod uwagę fakt, że PFASs występują najczęściej w złożonych próbkach, zawierających wiele różnych związków

chemicznych, w których ich stężenie jest wielokrotnie mniejsze od matrycy oraz brak znajomości dokładnej struktury chemicznej analitu, analizy stają się trudniejsze. Należy wtedy posłużyć się technikami półilościowymi, pośrednimi, opartymi na przykład na wyznaczaniu całkowitej zawartości fluoru organicznego [47].

Do oznaczania ilościowego i/lub jakościowego PFASs stosuje się także technikę emisji promieni gamma indukowanych protonami, chromatografię jonową wykorzystującą spalanie, spektroskopię jądrowego rezonansu magnetycznego fluoru (^{19}F NMR), metody wykorzystujące zjawiska fluorescencji i luminescencji oraz techniki elektrochemiczne [47].

5. Obecność PFASs w ściekach

Źródłem PFASs w środowisku wodnym, które zostało najprecyzyjniej zbadane, są ścieki oczyszczone. PFASs znajdują się nie tylko w ściekach oczyszczonych kierowanych do odbiornika, ale również w osadach ściekowych, odciekach z przeróbki osadów ściekowych oraz w wodach odzyskanych ze ścieków [25]. Należy mieć na uwadze, że odzysk wody ze ścieków oczyszczonych i wykorzystanie jej np. do nawadniania obszarów rolniczych stanowi źródło skażenia mikrozanieczyszczeniami, w tym PFASs, i może mieć wpływ na zdrowie ludzi oraz jakość wód gruntowych oraz rzek [40]. Badania przeprowadzone w gospodarstwie rolnym w pobliżu Melbourne, które wykorzystywało ścieki oczyszczone do nawadniania pól wykazały, że wody gruntowe zawierały PFOS o stężeniu 11 ng/dm^3 (maksymalnie 34 ng/dm^3) oraz PFOA o stężeniu $2,2 \text{ ng/dm}^3$ [46].

Należy mieć na uwadze, że oczyszczalnie ścieków nigdy nie były i nadal nie są projektowane do usuwania PFASs ze ścieków, gdyż nie ma w tym zakresie odpowiednich regulacji prawnych. Jednakże na całym świecie prowadzony jest monitoring PFASs w ściekach, jednak jego intensywność jest mocno zróżnicowana pomiędzy krajami, co można tłumaczyć wyższą zawartością PFASs w ściekach na terenach o wyższym poziomie zurbanizowania i uprzemysłowienia, co potencjalnie wyjaśnia sporą liczbę badań przeprowadzonych w Chinach [49]. Analogicznie, w krajach o niskiej produkcji przemysłowej należy spodziewać się, że liczba prowadzonych badań będzie zredukowana. Oczywiście PFASs mogą występować i w krajach niewykazujących produkcji, jako następstwo używania produktów importowanych [9]. Brak pełnych danych opisujących występowanie i przekształcanie PFASs w oczyszczalniach ścieków w różnych krajach powoduje, że pełne zrozumienie ich globalnej produkcji, stosowania i przemieszczania się jest niemożliwe. Bywa tak, że w danym państwie dokonuje się analizy wielu oczyszczalni ścieków w ramach jednego badania, a w innym istnieje wiele analiz pojedynczych obiektów. Wyklucza to możliwość porównania krajów tylko na podstawie liczby prowadzonych badań [28].

PFOA jest najczęściej identyfikowanym związkiem z grupy PFAS w europejskich ściekach. Wykazano, że konwencjonalne procesy technologiczne stosowane w oczyszczalniach ścieków nie zapewniają jego skutecznego usuwania. W niektórych badaniach odnotowano nawet wyższe stężenia PFOA w ściekach oczyszczonych niż w dopływających, co tłumaczy się prawdopodobną transformacją związków prekursorowych. W skali globalnej mediana stężeń PFOA w ściekach wynosi 27 ng/l . Z kolei dane z monitoringu obejmującego 90 europejskich oczyszczalni

ni ścieków wskazują, że maksymalne, średnie oraz medianowe stężenia PFOA osiągają odpowiednio 15 900 ng/l, 255 ng/l oraz 12,9 ng/l [31].

W tabeli 3 ujęto przykładowe stężenia różnych klas PFASs wykrytych w ściekach dopływających i odpływających z oczyszczalni ścieków. Okazuje się, że PFAAs są obecne w większej ilości i w wyższych stężeniach w ściekach w porównaniu z innymi klasami PFASs.

Tabela 3. Stężenia różnych rodzajów PFASs w ściekach dopływających do oczyszczalni oraz ściekach oczyszczonych [28]
Table 3. Concentrations of various types of PFASs in wastewater flowing into treatment plants and in treated wastewater [28]

| Związek chemiczny | Stężenie w ściekach dopływających [ng/dm ³] | Stężenie w ściekach oczyszczonych [ng/dm ³] |
|-------------------|---|---|
| PFAS | od 10 do 15 | od 14 do 24 |
| PFAA | 81 ± 25 | - |
| PFCA | 930 | 780 |
| PFSA | 490 | 260 |
| PFPrA | 17 ± 2 | 14 ± 2 |
| PFBA | 5 | 4 |
| PFPeA | 2 | 1 |
| PFHxA2 | 2 | 3 |
| PFBS | 2 | 3 |
| PFHpA | 2 | 20 |
| PFOA | 3 | 65 |
| PFHxS | 7 | 18 |
| PFHpS | 2 | 3 |
| PFOS | 11 | 35 |

Dotychczas powstało niewiele prac poświęconych badaniom stężeń PFASs na różnych etapach oczyszczania ścieków. Warunki pracy reaktorów biologicznych działających w oparciu o metodę osadu czynnego, tj. czas retencji osadu, stężenie osadu, temperatura w reaktorze biologicznym, szybkość przepływu oraz stężenie zawiesiny w ściekach oczyszczonych, decydują o losie PFAS [24]. Dłuższy czas retencji oraz wyższa temperatura procesu prowadzą do powstania PFAAs, co zwiększa jego stężenie w ściekach [19]. Z drugiej strony, unikalne parametry pracy związane z wyższym stężeniem osadu czynnego w reaktorach biologicznych (ok. 5 000 mg/dm³) i dłuższym czasem retencji osadu (około 45 dni) znacząco zwiększyły usuwanie PFAS z fazy wodnej w oczyszczalni ścieków stosującej recyrkulację osadu czynnego [24]. Istotne są również źródła ścieków (bytowe, przemysłowe, rolnicze), warunki klimatyczne oraz depozycja atmosferyczna, które to implikowały stężenie różnych PFASs oraz ich usuwanie z fazy wodnej w oczyszczalniach ścieków [36]. Brak przystosowania oczyszczalni ścieków do usuwania tego rodzaju zanieczyszczeń, często skutkuje tym, że stężenia PFASs w ściekach oczyszczonych przekraczają stężenia w dopływie. Jest to spowodowane przekształcaniem prekursorów PFASs i substancji polifluoroalkilowych w terminalne, perfluoroalkilowe substancje alkilowe podczas procesu oczyszczania [41]. Pan i in. (2014) wykazali, że zastosowanie promieniowania UV do dezynfekcji ścieków przyczyniło się do obniżenia o 3,6–11% stężenia sumy 18 związków PFAS w trzech różnych oczyszczalniach ścieków w południowych Chinach, natomiast zastosowanie Cl₂ do dezynfekcji

skutkowało wzrostem ich stężenia o ok. 29% (w każdej z oczyszczalni pobrano tylko jedną 24-godziną próbkę zbiorczą, wyniki nie uwzględniają zmienności czasowej) [32].

Oprócz czynników procesowych i zewnętrznych, kluczowy jest również rodzaj PFAS. Na przykład PFAAs, najliczniejsza klasa PFASs, które zwykle występują w formach anionowych, są nietlotne i odporne na biodegradację [2]. Mocne wiązania węgiel-fluor sprawiają, że PFAAs są wyjątkowo trwałe, a dziś można je znaleźć powszechnie w środowisku na całym świecie. Niektóre PFAA mają potencjał do bioakumulacji i biomagnifikacji [6, 42]. Neutralne PFASs, które są głównie prekursorami, takimi jak FTOH i perfluoroalkilosulfonamidoetanol, są lotne i/lub półlotne [2, 22, 48] i stąd mogą być uwalniane do atmosfery z oczyszczalni ścieków [14]. Do tej pory wiedza dotycząca emisji lotnych i/lub półlotnych PFAS z oczyszczalni ścieków do atmosfery i wpływu różnych procesów oczyszczania jest ograniczona. Ze względu na złożoną matrycę ściekową, reakcje biologiczne i fizykochemiczne oraz unikalne właściwości PFASs, oczyszczalnie ścieków bezpośrednio lub pośrednio służą jako źródło lub pochłaniacz różnych PFASs [8]. W związku z tym skuteczność różnych procesów oczyszczania mających na celu usuwanie związków PFAS i ograniczanie ich powstawania w oczyszczalniach ścieków wymaga dalszych badań.

6. Podsumowanie

Rozwój cywilizacyjny przynosi odkrywanie nowych związków chemicznych, które mogą znaleźć powszechne zastosowania w życiu codziennym. Początkowo syntetyzowane związki, które są tanie, stabilne, praktyczne oraz wytrzymałe wydają się idealną odpowiedzią na rosnące potrzeby ludzi. W wielu przypadkach okazuje się jednak, że wprowadzane do obiegu środowiskowego cząsteczki lub produkty ich rozkładu stanowią zagrożenie i stwarzają problemy, których rozwiązanie przysparza więcej problemów niż korzyści z ich wdrożenia. Taka sytuacja występuje w przypadku PFASs, związków, które wprowadzono do produkcji przedmiotów codziennego użytku. Z czasem ich bioakumulacja i negatywny wpływ na organizmy żywe wymusiły wycofanie części z nich, jednak postępowanie z tymi zanieczyszczeniami stanowi duże wyzwanie, gdyż PFASs stanowią trwały element zanieczyszczający środowisko. Wymusiło to badania nad opracowaniem technik analitycznych, dzięki którym możliwe jest oznaczanie ilościowe oraz jakościowe PFASs. Ważne jest także opracowanie skutecznych metod rozkładu tworzących produkty bezpieczne oraz usuwania pozostałości ze środowiska naturalnego. Należy również pochylić się nad monitorowaniem stężenia PFAS w ściekach komunalnych, dane te mogą stanowić cenne źródło informacji o poziomie ładunku zanieczyszczeń tych związków kierowanego do środowiska. Jednakże taki monitoring dopiero zaczyna być wdrażany, głównie w krajach wysokorozwiniętych.

7. Bibliografia

- [1] Adamson D. T., Nickerson A., Kulkarni P. R., Higgins C. P., Popovic J., Field J., Rodowa A., Newell C., DeBlanc P., Kornuc J. J. (2020). Mass-based, field-scale demonstration of PFAS retention within AFFF-associated source areas. *Environmental Science & Technology*, 54(24), 15768-15777. <https://doi.org/10.1021/acs.est.0c04472>
- [2] Ateia, M., Arifuzzaman, M., Pellizzeri, S., Attia, M. F., Tharayil,

- N., Anker, J. N., & Karanfil, T. (2019). Cationic polymer for selective removal of GenX and short-chain PFAS from surface waters and wastewaters at ng/L levels. *Water research*, 163, 114874. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2019.114874>
- [3] Awad R., Zhou Y., Nyberg E., Namazkar S., Yongning W., Xiao Q., Sun Y., Zhu Z., Bergman Å., Benskin J. P. (2020). Emerging per- and polyfluoroalkyl substances (PFAS) in human milk from Sweden and China. *Environmental Science: Processes & Impacts*, 22(10), 2023-2030. <https://doi.org/10.1039/D0EM00077A>
- [4] Barbo, N., Stoiber, T., Naidenko, O. V., & Andrews, D. Q. (2023). Locally caught freshwater fish across the United States are likely a significant source of exposure to PFOS and other perfluorinated compounds. *Environmental research*, 220, 115165. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2022.115165>
- [5] Brase, R. A., Mullin, E. J., & Spink, D. C. (2021). Legacy and emerging per- and polyfluoroalkyl substances: analytical techniques, environmental fate, and health effects. *International journal of molecular sciences*, 22(3), 995. <https://doi.org/10.3390/ijms22030995>
- [6] Bräunig, J., Baduel, C., Heffernan, A., Rotander, A., Donaldson, E., & Mueller, J. F. (2017). Fate and redistribution of perfluoroalkyl acids through AFFF-impacted groundwater. *Science of the Total Environment*, 596, 360-368. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.04.095>
- [7] Buck R. C., Franklin J., Berger U., Conder J. M., Cousins I. T., De Voogt P., Jensen A. A., Kannan K., Mabury S. A., Van Leeuwen S. P. (2011). Perfluoroalkyl and polyfluoroalkyl substances in the environment: terminology, classification, and origins. *Integrated environmental assessment and management*, 7(4), 513-541. <https://doi.org/10.1002/ieam.258>
- [8] Chen, S., Zhou, Y., Meng, J., & Wang, T. (2018). Seasonal and annual variations in removal efficiency of perfluoroalkyl substances by different wastewater treatment processes. *Environmental pollution*, 242, 2059-2067. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2018.06.078>
- [9] Coggan T. L., Moodie D., Kolobaric A., Szabo D., Shimeta J., Crosbie N. D., Lee E., Fernandes M., Clarke B. O. (2019). An investigation into per- and polyfluoroalkyl substances (PFAS) in nineteen Australian wastewater treatment plants (WWTPs). *Heliyon*, 5(8) <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2019.e02316>
- [10] Curtzwiler, G. W., Silva, P., Hall, A., Ivey, A., & Vorst, K. (2020). Significance of perfluoroalkyl substances (PFAS) in food packaging. *Integrated Environmental Assessment and Management*, 17(1), 7-12. <https://doi.org/10.1002/ieam.4346>
- [11] Ehsan, M. N., Riza, M., Pervez, M. N., Khyum, M. M. O., Liang, Y., & Naddeo, V. (2023). Environmental and health impacts of PFAS: Sources, distribution and sustainable management in North Carolina (USA). *Science of the total environment*, 878, 163123. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.163123>
- [12] Evich M. G., Davis M. J. B., McCord J. P., Acrey B., Awkerman J. A., Knappe D. R. U., Lindstrom A. B., Speth T. F., Tebes-Stevens C., Strynar M. J., Wang Z., Weber E. J., Henderson W. M., Washington J. W. (2022). Per- and polyfluoroalkyl substances in the environment. *Science*, 375(6580), eabg9065. <https://doi.org/10.1126/science.abg9065>
- [13] Fenton S. E., Ducatman A., Boobis A., DeWitt J. C., Lau C., Ng C., Smith J. S., Roberts S. M. (2021). Per- and polyfluoroalkyl substance toxicity and human health review: Current state of knowledge and strategies for informing future research. *Environmental toxicology and chemistry*, 40(3), 606-630. <https://doi.org/10.1002/etc.4890>
- [14] Fuertes, I., Gómez-Lavín, S., Elizalde, M. P., & Urriaga, A. (2017). Perfluorinated alkyl substances (PFASs) in northern Spain municipal solid waste landfill leachates. *Chemosphere*, 168, 399-407. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2016.10.072>
- [15] Gaines, L. G. (2023). Historical and current usage of per- and polyfluoroalkyl substances (PFAS): A literature review. *American Journal of Industrial Medicine*, 66(5), 353-378. <https://doi.org/10.1002/ajim.23362>
- [16] Gallen, C., Eaglesham, G., Drage, D., Nguyen, T. H., & Mueller, J. F. (2018). A mass estimate of perfluoroalkyl substance (PFAS) release from Australian wastewater treatment plants. *Chemosphere*, 208, 975-983. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2018.06.024>
- [17] Ghisi, R., Vamerali, T., & Manzetti, S. (2019). Accumulation of perfluorinated alkyl substances (PFAS) in agricultural plants: A review. *Environmental research*, 169, 326-341. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2018.10.023>
- [18] Giesy, J. P., & Kannan, K. (2001). Global distribution of perfluorooctane sulfonate in wildlife. *Environmental science & technology*, 35(7), 1339-1342. <https://doi.org/10.1021/es001834k>
- [19] Guerra, P., Kim, M., Kinsman, L., Ng, T., Alaei, M., & Smyth, S. A. (2014). Parameters affecting the formation of perfluoroalkyl acids during wastewater treatment. *Journal of Hazardous Materials*, 272, 148-154. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2014.03.016>
- [20] Guillet, T. C., Jackson, T. W., Guillet, M., McCord, J., & Belcher, S. M. (2022). Blood concentrations of per- and polyfluoroalkyl substances are associated with autoimmune-like effects in American alligators from Wilmington, North Carolina. *Frontiers in Toxicology*, 4, 1010185. <https://doi.org/10.3389/ftox.2022.1010185>
- [21] Habib Z., Song M., Ikram S., Zahra Z. 2024. „Overview of Per- and Polyfluoroalkyl Substances (PFAS), Their Applications, Sources, and Potential Impacts on Human Health”. *Pollutants* 4: 136–152. <https://doi.org/10.3390/pollutants4010009>
- [22] Hamid, H., Li, L. Y., & Grace, J. R. (2018). Review of the fate and transformation of per- and polyfluoroalkyl substances (PFASs) in landfills. *Environmental Pollution*, 235, 74-84. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2017.12.030>
- [23] Kasonga, T. K., Coetzee, M. A., Kamika, I., Ngole-Jeme, V. M., & Momba, M. N. B. (2021). Endocrine-disruptive chemicals as contaminants of emerging concern in wastewater and surface water: A review. *Journal of Environmental Management*, 277, 111485. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.111485>
- [24] Kibambe, M. G., Momba, M. N. B., Daso, A. P., & Coetzee, M. A. A. (2020). Evaluation of the efficiency of selected wastewater treatment processes in removing selected perfluoroalkyl substances (PFASs). *Journal of environmental management*, 255, 109945. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.109945>
- [25] Kurwadkar S., Dane J., Kanel S. R., Nadagouda M. N., Cawdrey R. W., Ambade B., Struckhoff G. C., Wilkin R. (2022). Per- and polyfluoroalkyl substances in water and wastewater: A critical review of their global occurrence and distribution. *Science of the Total Environment*, 809, 151003. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.151003>
- [26] Lam N.-H., Cho C.-R., Lee J.-S., Soh H.-Y., Lee B.-C., Lee J.-A., Tatarozako N., Sasaki K., Saito N., Iwabuchi K. (2014). Perfluorinated alkyl substances in water, sediment, plankton and fish from Korean rivers and lakes: a nationwide survey. *Science of the Total Environment*, 491, 154-162. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2014.01.045>
- [27] Lee, L. (2021, April). PFAS Characteristics, Fate and challenges in waste management. In 2021 *Emerging Contaminants in the Environment Conference* (ECEC21).
- [28] Lenka, S. P., Kah, M., & Padhye, L. P. (2021). A review of the occurrence, transformation, and removal of poly- and

- perfluoroalkyl substances (PFAS) in wastewater treatment plants. *Water research*, 199, 117187. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2021.117187>
- [29] Manojkumar, Y., Pilli, S., Rao, P. V., & Tyagi, R. D. (2023). Sources, occurrence and toxic effects of emerging per-and polyfluoroalkyl substances (PFAS). *Neurotoxicology and Teratology*, 97, 107174. <https://doi.org/10.1016/j.ntt.2023.107174>
- [30] OECD. 2015. *Risk Reduction Approaches for Per- and polyfluoroalkyl substances (PFASs) – A Cross-Country Analysis* OECD.
- [31] Page, D., Vanderzalm, J., Kumar, A., Cheng, K. Y., Kaksonen, A. H., & Simpson, S. (2019). Risks of perfluoroalkyl and polyfluoroalkyl substances (PFAS) for sustainable water recycling via aquifers. *Water*, 11(8), 1737. <https://doi.org/10.3390/w11081737>
- [32] Pan, C. G., Ying, G. G., Zhao, J. L., Liu, Y. S., Jiang, Y. X., & Zhang, Q. Q. (2014). Spatiotemporal distribution and mass loadings of perfluoroalkyl substances in the Yangtze River of China. *Science of the total environment*, 493, 580-587. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2014.06.033>
- [33] Panieri, E., Baralic, K., Djukic-Cosic, D., Buha Djordjevic, A., & Saso, L. (2022). PFAS molecules: a major concern for the human health and the environment. *Toxics*, 10(2), 44. <https://doi.org/10.3390/toxics10020044>
- [34] Place, B. J., & Field, J. A. (2012). Identification of novel fluorochemicals in aqueous film-forming foams used by the US military. *Environmental science & technology*, 46(13), 7120-7127. <https://doi.org/10.1021/es301465n>
- [35] Plumlee, M. H., Larabee, J., & Reinhard, M. (2008). Perfluorochemicals in water reuse. *Chemosphere*, 72(10), 1541-1547. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2008.04.057>
- [36] Ratola, N., Cincinelli, A., Alves, A., & Katsoyiannis, A. (2012). Occurrence of organic microcontaminants in the wastewater treatment process. A mini review. *Journal of hazardous materials*, 239, 1-18. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2012.05.040>
- [37] Rehman, A. U., Crimi, M., & Andreescu, S. (2023). Current and emerging analytical techniques for the determination of PFAS in environmental samples. *Trends in environmental analytical chemistry*, 37, e00198. <https://doi.org/10.1016/j.teac.2023.e00198>
- [38] Ruyle B. J., Pickard H. M., LeBlanc D. R., Tokranov A. K., Thackray C. P., Hu X. C., Vecitis C. D., Sunderland E. M. (2021). Isolating the AFFF signature in coastal watersheds using oxidizable PFAS precursors and unexplained organofluorine. *Environmental Science & Technology*, 55(6), 3686-3695. <https://doi.org/10.1021/acs.est.0c07296>
- [39] Shahsavari, E., Rouch, D., Khudur, L. S., Thomas, D., Aburto-Medina, A., & Ball, A. S. (2021). Challenges and current status of the biological treatment of PFAS-contaminated soils. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*, 8, 602040. <https://doi.org/10.3389/fbioe.2020.602040>
- [40] Shan, G., Wang, Z., Zhou, L., Du, P., Luo, X., Wu, Q., & Zhu, L. (2016). Impacts of daily intakes on the isomeric profiles of perfluoroalkyl substances (PFASs) in human serum. *Environment international*, 89, 62-70. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2016.01.002>
- [41] Sigler, K., Messer, T. L., Ford, W., & Sanderson, W. (2024). Occurrence, transformation, and transport of PFAS entering, leaving, and flowing past wastewater treatment plants with diverse land uses. *Journal of Environmental Management*, 371, 123129. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2024.123129>
- [42] Sinclair, E., Mayack, D. T., Roblee, K., Yamashita, N., & Kannan, K. (2006). Occurrence of perfluoroalkyl surfactants in water, fish, and birds from New York State. *Archives of environmental contamination and toxicology*, 50(3), 398-410. <https://doi.org/10.1007/s00244-005-1188-z>
- [43] Sunderland, E. M., Hu, X. C., Dassuncao, C., Tokranov, A. K., Wagner, C. C., & Allen, J. G. (2019). A review of the pathways of human exposure to poly-and perfluoroalkyl substances (PFASs) and present understanding of health effects. *Journal of exposure science & environmental epidemiology*, 29(2), 131-147. <https://doi.org/10.1038/s41370-018-0094-1>
- [44] United Nations Environment Programme. n.d. *The Stockholm Convention – National Implementation Plans – Addressing COP 4 amendments*. United Nations Environment Programme. <https://isap.sejm.gov.pl/isap.nsf/download.xsp/WDU20160000549/O/D20160549.pdf> (dostęp: 10 grudnia 2026).
- [45] Verma, S., Varma, R. S., & Nadagouda, M. N. (2021). Remediation and mineralization processes for per-and polyfluoroalkyl substances (PFAS) in water: A review. *Science of the total environment*, 794, 148987. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.148987>
- [46] Vo H., Ngo H., Guo W., Nguyen T., Li J., Liang H., Deng L., Chen Z., Nguyen T. (2020). Poly-and perfluoroalkyl substances in water and wastewater: A comprehensive review from sources to remediation. *Journal of Water Process Engineering*, 36, 101393. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2020.101393>
- [47] Vu, C. T., & Wu, T. (2022). Recent progress in adsorptive removal of per-and poly-fluoroalkyl substances (PFAS) from water/wastewater. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 52(1), 90-129. <https://doi.org/10.1080/10643389.2020.1816125>
- [48] Wang Q., Zhao Z., Ruan Y., Hua X., Chen H., Wang Y., Jin L., Tsui M., Yao Y., Lam P., Sun H. (2021). Occurrence and seasonal distribution of legacy and emerging per-and polyfluoroalkyl substances (PFASs) in different environmental compartments from areas around ski resorts in northern China. *Journal of Hazardous Materials*, 407, 124400. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.124400>
- [49] Wang, T., Wang, P., Meng, J., Liu, S., Lu, Y., Khim, J. S., & Giesy, J. P. (2015). A review of sources, multimedia distribution and health risks of perfluoroalkyl acids (PFAAs) in China. *Chemosphere*, 129, 87-99. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2014.09.021>
- [50] Wang, Y., Munir, U., & Huang, Q. (2023). Occurrence of per-and polyfluoroalkyl substances (PFAS) in soil: Sources, fate, and remediation. *Soil & Environmental Health*, 1(1), 100004. <https://doi.org/10.1016/j.seh.2023.100004>
- [51] Wang Z., DeWitt J. C., Higgins C. P., Cousins I. T. (2017). A never-ending story of per- and polyfluoroalkyl substances (PFASs)? *Environmental Science & Technology* 51 (5): 2508-2518. <https://doi.org/10.1021/acs.est.6b04806>
- [52] Xiao, F., Simcik, M. F., Halbach, T. R., & Gulliver, J. S. (2015). Perfluorooctane sulfonate (PFOS) and perfluorooctanoate (PFOA) in soils and groundwater of a US metropolitan area: Migration and implications for human exposure. *Water research*, 72, 64-74. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2014.09.052>

ARTYKUŁ PARTNERA

Gaz ziemny – paliwo transformacji, surowiec dla przemysłu

ORLEN S.A. – Zespół Oddziałów Upstream Polska



Transformacja energetyczna bywa przedstawiana w uproszczony sposób jako szybkie i liniowe przejście od paliw kopalnych do odnawialnych źródeł energii. Rzeczywistość technologiczna i ekonomiczna jest znacznie bardziej złożona. OZE są zależne od pogody, a system energetyczny potrzebuje stabilnych źródeł, które będą go bilansowały. Gaz ziemny to znacznie więcej niż surowiec energetyczny. To wielofunkcyjny zasób, bez którego wiele sektorów przemysłu nie mogłoby działać. Dlatego może odgrywać ważną rolę w gospodarce jeszcze przez dekady.

We współczesnej gospodarce gaz ziemny, wśród wielu zastosowań, ma dwa podstawowe. Jedno to paliwo gazowe, gdzie przy spalaniu gaz zamieniany jest w różne formy energii. Drugie to surowiec, który w procesach technologicznych jest źródłem głównie wodoru.

Gaz ważnym surowcem w przemyśle

Obok energetyki, w tym ciepłownictwa, kluczowym odbiorcą gazu pozostaje przemysł, zwłaszcza rafineryjny, petrochemiczny i nawozowy.

Szacunki Międzynarodowej Federacji Nawozowej (International Fertilizer Association, IFA) mówią, że 60–70 procent światowej produkcji nawozów opiera się na gazie ziemnym i sytuacja ta nie zmienia się co najmniej do 2040 roku. Proces technologiczny, w ramach którego azot z powietrza łączony jest z wodorem pochodzącym z gazu ziemnego, odpowiada za ponad 70 proc. światowej produkcji amoniaku, który jest kluczowym składnikiem nawozów azotowych. Bez gazu zagrożone byłoby bezpieczeństwo żywnościowe i ciągłość dostaw w rolnictwie.

Gaz jest używany do wytwarzania wielu substancji chemicznych, jak etylen, propylen, metanol czy gaz syntezowy. Te związki są w dalszej kolejności wykorzystywane do produkcji tworzyw sztucznych, barwników i innych produktów. Gaz jest też używany w petrochemii, do produkcji związków chemicznych, także w procesach destylacji i krawingu ropy, w wyniku czego otrzymuje się między innymi benzynę, oleje smarowe, olej napędowy, asfalt i wiele innych produktów.

Z gazu korzysta branża kosmetyczna czy przemysł farmaceutyczny, między innymi do przeprowadzania reakcji chemicznych, będących częścią procesu wytwarzania niektórych leków czy substancji aktywnych.

Gaz jest ważny także w hutnictwie i przemyśle szklarskim, zapewnia bowiem wysoką temperaturę potrzebną do wytopu. Produkcja stali, cementu, szkła i ceramiki w dużej mierze zależy od tego surowca.

Dywersyfikacja importu...

Polska odrobiła lekcję, wynikającą z gazowej zależności od Rosji. Przez lata powstała odpowiednia infrastruktura – połączenia gazowe z sąsiadami, podmorski gazociąg Baltic Pipe, który łączy złoża w Norwegii z krajowym systemem przesyłowym, a także gazoport w Świnoujściu, odbierający dostawy LNG. Po oddaniu pływającego terminala FSRU w Zatoce Gdańskiej, wraz z rozbudowanymi mocami terminala w Świnoujściu łączna przepustowość obu instalacji wyniesie ponad 14 mld m sześć., co zapewni elastyczność dostaw dostosowanych do bieżącego zapotrzebowania i pochodzących z różnych kierunków na całym świecie. Dodatkowym elementem stabilizującym te dostawy jest flota gazowców, pozostających w dyspozycji ORLENU.

ORLEN, mając zawarte umowy na zakup LNG czy też gazu dostarczanego rurociągami posiada zdywersyfikowany portfel importowy. Odpowiada on na rosnący popyt i pozwala optymalnie wykorzystywać dostępną infrastrukturę.

...i wydobyć własne

Krajowe bezpieczeństwo energetyczne nie opiera się wyłącznie na imporcie. Coraz większe znaczenie ma własne wydobywanie, realizowane w Polsce i za granicą. Strategia ORLEN 2025 zakłada wzrost produkcji – do 12 mld m sześć. rocznie. To ambitny cel, ale niezbędny dla wzmocnienia niezależności i stabilności dostaw. W dążeniu do osiągnięcia neutralności klimatycznej gaz będzie mógł pełnić funkcję paliwa transformacji jeszcze przez wiele lat. Własny surowiec daje największą pewność dostaw. Rozumiejąc to, ORLEN inwestuje w wydobywanie własne zarówno w kraju, jak i za granicą, zwłaszcza na Norweskim Szelfie Kontynentalnym. Kluczem do sukcesu jest precyzyjne planowanie i efektywne zarządzanie posiadanymi zasobami, a przede wszystkim unikalna wiedza oparta na dziesiątkach lat doświadczenia. W poszukiwaniach ORLEN koncentruje się na złożach, które znajdują się w pobliżu już eksploatowanych przez spółkę. Umożliwia to wykorzystanie istniejącej infrastruktury i pozwala ograniczyć koszty inwestycji. Ponadto, dzięki zastosowaniu nowych rozwiązań technicznych, spółka jest w stanie wydobyć dodatkowe zasoby ropy i gazu na już zagospodarowanych złożach. Możliwość zapewnienia wydobycia gazu z własnych, w tym krajowych zasobów jest kluczowym stabilizatorem, wspierającym bezpieczeństwo energetyczne Polski.



Źródło: materiały własne ORLEN S.A.

Bezpieczeństwo energetyczne i rozwój lokalny

Wzrost i utrzymanie krajowego wydobycia gazu ziemnego na założonym w Strategii ORLEN 2025 poziomie około 4 mld m sześć. rocznie to odpowiedzialna inwestycja w zwiększenie bezpieczeństwa energetycznego. Eksploatacja krajowych zasobów to także wymierne korzyści dla mieszkańców rejonów, gdzie działalność operacyjną prowadzi Grupa ORLEN. Wydłużenie pracy na złożach to źródło dochodu nie tylko dla samorządów, do budżetów których ORLEN odprowadza opłatę eksploatacyjną od prowadzonego wydobycia oraz podatek od nieruchomości, ale także partnerów biznesowych, w tym lokalnych podwykonawców. W Grupie ORLEN funkcjonują spółki operujące w różnych branżach, wykorzystanie ich kompetencji we wspólnych projektach wzmacnia synergie w koncernie, czego przykładem są np. badania geologiczne pod morskie farmy wiatrowe, wykonane przez spółki segmentu upstream. ORLEN angażuje również wielu zewnętrznych wykonawców czy dostawców usług, w realizację dużych i często skomplikowanych przedsięwzięć. Dla firm zapraszanych do współpracy w myśl idei „local content”, udział w projektach Grupy ORLEN nie tylko zapewnia stabilne przychody, ale pozwala też wzmacniać rynkową pozycję i budować specjalistyczne kompetencje, stanowiące impuls rozwojowy w dalszej ich działalności.

Wodór z Finlandii dla polskiego przemysłu – ORLEN podpisuje kluczowe porozumienia

www.orken.pl



ORLEN podpisał porozumienia o współpracy z trzema fińskimi partnerami w zakresie produkcji i dostaw wodoru odnawialnego oraz jego pochodnych. Zawarte z ABO Energy Suomi, Nordic Ren - Gas oraz VolagHy Kuopio SPV umowy umożliwią zabezpieczenie dostaw tego paliwa na etapie zwiększonego zapotrzebowania w kolejnych latach. Koncern rozwija technologie wodorowe jako jeden z kluczowych elementów dekarbonizacji przemysłu. Spółka planuje również wykorzystywać kawerny solne zlokalizowane w Polsce do jego wielkoskalowego magazynowania.

– Polska gospodarka powinna dywersyfikować źródła pozyskiwania energii, ponieważ zwiększa to nasze bezpieczeństwo gospodarcze i polityczne. Podpisane porozumienia dają szansę na rozwój technologii wodorowych i możliwości produkcyjnych tego paliwa w Polsce – podkreśla **Wojciech Balczun, Minister Aktywów Państwowych**. – Wodór określany jest jako paliwo przyszłości, a polskie firmy muszą się włączyć do wyścigu o jego jak najlepsze wykorzystanie. ORLEN ma do tego odpowiednie zasoby i know-how, a teraz będzie miał także wsparcie doświadczonych partnerów z Finlandii, która jest naszym bliskim sojusznikiem – dodaje minister.

Fińskie firmy, z którymi ORLEN podpisał porozumienia, realizują kluczowe projekty w zakresie produkcji wodoru odnawialnego oraz jego pochodnych: ABO Energy Suomi rozwija instalacje o łącznej mocy do 100 tys. ton wodoru rocznie, Nordic RenGas buduje zintegrowane zakłady produkujące e-metan z wykorzystaniem odnawialnego wodoru i biogenicznego CO₂, a VolagHy Kuopio SPV rozwija projekt wytwarzania paliw syntetycznych o zdolności ok. 50 tys. ton rocznie, planując dalszą ekspansję w regionie nordyckim.

– Zawarte umowy to dla nas istotny element budowania europejskiego ekosystemu wodorowego. Umożliwią nam skorzystanie z wiedzy i doświadczeń fińskich firm, które zapewnią nam wodór na konkurencyjnych warunkach. ORLEN z kolei może go magazynować w Polsce i dostarczać do Europy Centralnej. Wszystkie trzy firmy konsekwentnie rozwijają technologie wodorowe i dążą do neutralności klimatycznej. To także jeden z naszych strategicznych celów, dlatego jestem przekonany, że nasza współpraca będzie ważnym krokiem w kierunku popularyzacji odnawialnego wodoru jako jednego z fundamentów dekarbonizacji unijnego przemysłu i sektora transportu – mówi **Marcin Wasilewski, Członek Zarządu ds. Transformacji ORLEN**.

Zawarte porozumienia obejmą również współpracę nad wypracowaniem modelu przyszłych dostaw wodoru oraz jego pochodnych do Polski. Partnerzy będą też współpracować nad określeniem warunków logistycznych, umożliwiających transport wodoru i jego pochodnych z Finlandii do zakładów rafineryjnych i chemicznych Grupy ORLEN w Polsce.

– Wodór może być paliwem i źródłem energii, jest też niezbędnym komponentem wielu procesów technologicznych w przemyśle. Każde z tych zastosowań wymaga efektywnego przesyłania oraz co najważniejsze – magazynowania tego surowca. Spółki z Grupy ORLEN, zajmujące się poszukiwaniem i wydoby-

ciem gazu i ropy naftowej, posiadają unikatowe doświadczenie i kompetencje związane z budową i zarządzaniem podziemnymi magazynami gazu. Mogą one skutecznie wspierać transformację i bezpieczeństwo energetyczne naszego regionu, dziś i w przyszłości – mówi **Wiesław Prugar, Członek Zarządu ds. Upstream ORLEN**.

Obecnie ORLEN posiada siedem czynnych podziemnych magazynów gazu. Grupa planuje rozbudowę możliwości w zakresie przesyłu i magazynowania wodoru, wykorzystując kompetencje i doświadczenia związane z geologią i wiertnictwem, a także znajomość warunków geologicznych Polski.

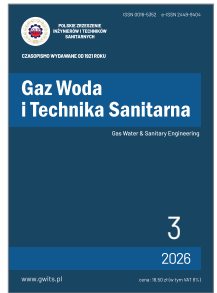
Podpisane umowy to kolejny krok w rozwijaniu współpracy ORLEN z fińskimi partnerami w obszarze wodoru. W ubiegłym roku Grupa podpisała pierwsze porozumienie z P2X Solutions Oy – liderem produkcji odnawialnego wodoru w Finlandii. Firma prowadzi pierwszą w Finlandii przemysłową instalację do produkcji odnawialnego wodoru i e-metanu w Harjavalta i planuje dalsze inwestycje, które pozwolą jej osiągnąć 1 GW mocy w ciągu następnej dekady.

– Cieszę się, że współpraca fińsko-polska nabiera tempa. Zróżnicowany miks energetyczny Finlandii zapewnia jedne z najbardziej stabilnych i przystępnych cen energii w Europie, co umożliwi firmom zwiększanie produkcji odnawialnego wodoru i wspieranie transformacji energetycznej. Wspólne projekty wzmacniają konkurencyjność i bezpieczeństwo energetyczne w obu krajach – mówi **Ville Tavio, Minister Rozwoju i Handlu Zagranicznego Finlandii**.

Współpraca z partnerami z regionu Morza Bałtyckiego stanowi istotny krok w kierunku budowy stabilnych łańcuchów dostaw wodoru i jego pochodnych do Polski. ORLEN, korzystając z doświadczeń międzynarodowych partnerów, otwiera sobie drogę do zapewnienia zdywersyfikowanych i konkurencyjnych cenowo dostaw odnawialnego wodoru na potrzeby wdrażania rozwiązań w kraju, które w perspektywie najbliższych lat odegrają kluczową rolę w zapewnieniu zeroemisyjnych paliw, realizując tym samym przyjętą przez koncern strategię do 2035 roku.



Źródło: materiały własne ORLEN S.A.



Artificial intelligence for hydraulic and water resources engineering: Challenges, opportunities and a research agenda

Sztuczna inteligencja w inżynierii wodnej i hydraulice: wyzwania, możliwości i program badawczy

Mozhgan Yarahmadi¹, Mahmood Rahmani Firozjaei^{2*} , Nasrin Rastinifard³

¹ Faculty of Natural Resources, University of Tehran, Iran

² School of Civil Engineering, College of Engineering, University of Tehran, Iran

³ Water, Energy and Environmental Engineering (WEEE) Research Cluster, Royal Agriculture University, UK

*Kontakt / Correspondence: mrahmanif69@gmail.com

Abstract:

Artificial intelligence (AI) and machine learning (ML) are essential in addressing water scarcity and ensuring access to clean water. These technologies have become integral to hydraulic engineering and water resource management, enhancing the management and optimization of water systems. They are employed in various applications, including optimizing and designing water treatment processes, monitoring water quality, tracking water consumption, managing groundwater resources, and supporting river engineering and flood management. Furthermore, they are instrumental in tackling hydrological challenges, such as those posed by climate change, thereby improving efficiency and effectiveness in water resource management.

Keywords: artificial intelligence, water resource management, machine learning, water domain

Streszczenie:

Sztuczna inteligencja (AI – artificial intelligence) i uczenie maszynowe (ML – machine learning) odgrywają kluczową rolę w rozwiązywaniu problemu niedoboru wody i zapewnianiu dostępu do czystej wody. Technologie te stały się integralną częścią inżynierii wodnej i zarządzania zasobami wodnymi, usprawniając zarządzanie i optymalizację systemów wodnych. Są one wykorzystywane w różnych zastosowaniach, w tym w optymalizacji i projektowaniu procesów uzdatniania wody, monitorowaniu jakości wody, śledzeniu zużycia wody, zarządzaniu zasobami wód podziemnych oraz wspieraniu inżynierii rzecznej i zarządzania powodzią. Ponadto odgrywają one kluczową rolę w rozwiązywaniu problemów hydrologicznych, takich jak te związane ze zmianami klimatu, poprawiając tym samym efektywność i skuteczność zarządzania zasobami wodnymi.

Słowa kluczowe: sztuczna inteligencja, zarządzanie zasobami wodnymi, uczenie maszynowe, dziedzina wody

1. Introduction

The growing scarcity of freshwater resources, exacerbated by climate change, population growth, and urbanization, presents a pressing global challenge. Water resources management (WRM) must prioritize efficiency, effectiveness, and adaptability to address these challenges. Artificial intelligence (AI) and machine learning (ML) offer powerful tools to achieve these goals, with applications in irrigation optimization, water quality monitoring, flood prediction, and water demand forecasting. These AI applications significantly enhance agricultural practices and

water distribution systems. Artificial intelligence (AI) simulates human intelligence in machines, allowing them to perform tasks that typically require human intellect, such as learning, reasoning, and problem-solving. Machine learning (ML) is a subset of artificial intelligence that focuses on building algorithms and statistical models, enabling computers to learn from data without explicit programming. By employing advanced algorithms, AI and ML can create predictive models that forecast water availability, demand, and potential risks, such as floods or droughts. These models can help stakeholders make informed decisions and implement proactive measures to manage water resources effec-

tively. AI and ML can process vast amounts of data from diverse sources—such as remote sensing, ground sensors, and citizen science—providing a more comprehensive and timely picture of water systems. This capability allows for improved monitoring of water quality, quantity, and distribution [6]. The hierarchical representation of artificial intelligence, machine, and deep learning are shown in Fig 1.

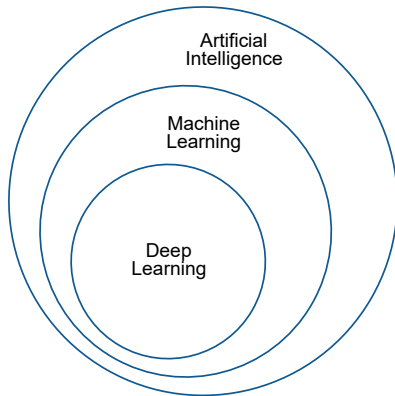


Fig. 1. The representation of artificial intelligence, machine and deep learning

Rys. 1. Struktura sztucznej inteligencji, uczenia maszynowego i głębokiego uczenia

In recent decades, the Artificial intelligence (AI) and machine learning approach has gained significant traction as a powerful alternative to traditional scientific discovery methods. This shift has opened up numerous opportunities and challenges across various fields, including hydraulic engineering, subsurface reservoirs, watershed engineering, and water resources management. Filo [11] highlights that artificial intelligence (AI) and machine learning (ML) have numerous applications in water resource management. Between 2013 and 2023, the number of publications in this area, as shown in Fig. 2, indicates that articles and conference papers account for over 90% of the documents reviewed. The publication landscape is diverse, with Engineering and Computer Science leading in numbers, followed by significant contributions from Environmental Science, Earth Science, and Energy. This diversity underscores the broad applicability of AI technologies and their potential for future development across various fields.

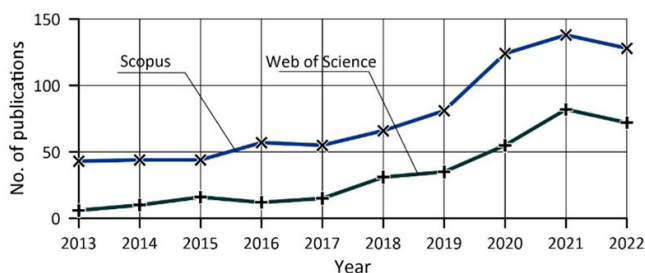


Fig. 2. The number of Scopus- and WoS-indexed publications on AI methods in hydraulic between 2013 and 2022 [11]

Rys. 2. Liczba publikacji indeksowanych w bazach Scopus i WoS na temat metod sztucznej inteligencji w hydraulice w latach 2013–2022 [11]

In the following, recent studies on artificial intelligence (AI) in hydraulic engineering and water resources management are discussed briefly. Various applications have been investigated, and this analysis is categorized into four main areas, along with the related challenges and opportunities.

1.1. Category 1: optimizing water treatment and water quality monitoring

Ensuring sustainable and clean water access is vital for water and wastewater treatment facilities, as well as for numerous natural and industrial systems that depend on this essential resource. One significant contribution of artificial intelligence (AI) and machine learning (ML) is in the realm of water quality monitoring. Artificial intelligence methods and machine learning models have proven effective in optimizing, modeling, and automating crucial operations in water treatment, monitoring of natural systems, and water-based agricultural practices, including hydroponics and aquaponics. These algorithms can analyze historical data to identify patterns and detect anomalies in key water quality indicators such as temperature, pH, dissolved oxygen, and nutrient levels. Furthermore, AI and ML can be utilized to forecast the occurrence of harmful algal blooms and other significant water quality issues.

Zhang et al. [47] evaluated a deep learning model that utilizes long short-term memory (LSTM) networks to detect time-delayed water quality indicators (WQIs) in wastewater treatment plant (WWTP) influent. The authors highlighted the importance of rapid and precise detection of WQIs for efficient plant operation, especially under varying sewage loads. They noted that traditional machine learning methods often fall short in accuracy, prompting the development of their LSTM approach. To enhance model interpretability, they applied global sensitivity analysis (GSA) using Shapley additive explanations (SHAP) to assess the impact of input indicators. Their case study demonstrated that the LSTM models effectively identified key pollutants, such as chemical oxygen demand, total nitrogen, and total phosphorus, outperforming several baseline models. This innovative combination of deep learning and GSA offers a promising solution for improving the sustainability and efficiency of WWTP operations. In [7] water quality index (WQI) models were optimized using machine learning. By combining machine learning and game theory, they developed combined weights to improve model accuracy, particularly in the Chaobai River Basin. The study introduced two new aggregation functions: SWM and LQM. Three WQI models were created, with WQIS recommended for poor water quality and WQIW for good quality. This research offered valuable insights for future water quality assessments and environmental protection. The investigations in [4, 20, 29] collectively underscored the significant role of machine learning and artificial intelligence (AI) in advancing water treatment and monitoring processes. Lowe et al. [29] provided a comprehensive review of how smart technologies integrate with AI to enhance water treatment efficacy and monitoring capabilities. Al Aani et al. [4] explored the potential of machine learning and AI to revolutionize process automation in water treatment and desalination, highlighting the transformative impact these technologies can have. Jawad et al. [20] focused on the application of artificial neural networks in modeling wastewater treatment and desalination through mem-

brane processes, showcasing innovative approaches to improve efficiency. Taloba [43] further evaluated the use of artificial neural networks specifically for optimizing energy consumption in water treatment and desalination facilities, which are crucial for providing clean drinking water. Given that these facilities are energy-intensive and contribute to greenhouse gas emissions, Taloba [43] emphasized the importance of energy optimization for environmental sustainability and economic efficiency. Collectively, these studies illustrate how AI and machine learning can address the challenges of water treatment, improve operational efficiency, and promote sustainable practices in the water sector.

1.2. Category 2: water consumption monitoring, water allocation, and groundwater management

Artificial intelligence and machine learning applications in water management extend beyond water quality to include water consumption monitoring, demand forecasting, irrigation optimization, and allocation. These technologies can develop models that optimize irrigation planning and reduce water consumption. Additionally, real-time water consumption monitoring enables the identification of high-usage areas and facilitates the development of water conservation plans. A review of research in [5, 24, 25, 45] highlights AI's transformative potential in smart water resource management. These studies explored AI applications in optimizing water management practices, short-term water demand forecasting, and water quality management. They emphasized the importance of machine learning algorithms in analyzing historical data and making accurate predictions. These findings underscore AI's crucial role in fostering sustainable water management practices across agricultural and urban contexts, addressing the growing challenges of water scarcity and resource optimization.

Goralski and Tan [15] highlighted the transformative potential of artificial intelligence (AI) in advancing sustainable water resource management. They emphasized that AI can provide real-time data on water availability and usage, which is crucial for optimizing water allocation and reducing waste. For example, AI-enabled sensors in irrigation systems empower farmers to fine-tune their water consumption practices, leading to reduced water loss and enhanced crop yields. Additionally, AI's capability to monitor water quality in real time allows for the swift identification of contaminated sources, safeguarding public health by preventing the use of unsafe water for consumption. In urban settings, AI applications extend to monitoring overall water consumption, detecting leaks in distribution systems, and prioritizing maintenance tasks, thereby improving the efficiency and reliability of water supply infrastructure. Chang et al. [6], Zekrifa et al. [50], Ghobadi and Kang [12] and Sit et al. [39] highlighted AI's transformative potential in hydrology and water resources management. These studies addressed the critical challenges of urban water management, including rising population, increased demand, and deteriorating water quality. AI offers innovative solutions like water quality monitoring, leakage detection, demand forecasting, flood management, water purification, and smart irrigation. Zekrifa et al. [50] explored AI integration for improved hydrological modeling, while Ghobadi and Kang [12] provide a systematic literature review on AI applications in water resources management. Sit et al. [39] evaluated deep learning's

transformative potential in hydrology. Doorn [8] explored the current applications of artificial intelligence (AI) in the water sector and suggested what „responsible AI” might entail in this context. She emphasizes that developing and applying responsible AI techniques should involve collaboration between water professionals and data scientists, as well as input from experts in the social sciences and humanities. Also, AI can enhance water conservation efforts by identifying areas of waste and recommending strategies to minimize consumption. For example, AI-enabled smart meters can track household water usage and detect instances of excessive consumption. This information can be used to provide consumers with feedback and suggestions for reducing their water use, thereby promoting more sustainable water practices. Collectively, these studies demonstrate AI's ability to enhance efficiency, sustainability, and responsiveness in water management systems, addressing modern water resource challenges.

1.3. Category 3: river engineering and flood management

Floods pose significant threats to infrastructure and human safety. Accurate flood forecasting and control are crucial for mitigation. Deep learning, with its ability to process vast amounts of data and provide precise predictions, offers a powerful tool for improving flood management. AI and ML can develop flood forecasting models that accurately predict timing and spatial extent. Additionally, these technologies can analyze river and watershed data to identify erosion-prone areas and inform effective erosion control programs. By focusing on vulnerable areas, AI enhances water resource management and promotes environmental sustainability.

Kabir et al. [21] developed a machine-learning framework for forecasting and visualizing flood inundation information. This innovative approach combines various machine learning algorithms to generate probabilistic flood inundation maps with a three-hour lead time. By employing rainfall-discharge models using a random forest technique alongside multi-layer perceptron classifiers, the framework effectively classifies wet and dry areas. Tested on data from a fluvial flood event in a flood-prone town in the UK, the model demonstrated high accuracy, with a mean arrival time difference of just 1 hour and 53 minutes compared to a traditional hydrodynamic model. Notably, this framework is user-friendly, efficiently identifies flooded areas, and significantly reduces computational time, making it a valuable tool for real-time flood management. Ekwueme [10] examined the use of machine learning to predict urban flood susceptibility in a tropical catchment area, specifically focusing on the southeastern region of Nigeria, which has been severely affected by floods due to climate change. The study emphasizes the importance of accurate forecasting and intervention strategies for effective flood mitigation. By analyzing regional hydrogeological data from 1981 to 2019 and processing remote sensing datasets from NASA and MERRA, the author developed an ARIMA model to forecast flooding patterns. This research aims to support regional agencies in adapting to flood challenges and assessing hydrologic extremes. Noymanee and Theeramunkong [34] investigated flood forecasting using machine learning techniques to enhance hydrological modeling in Thailand, where urban flooding is

a significant concern. The study highlights the need for real-time flood level predictions, as existing early warning systems often suffer from inaccuracies. To improve predictions, the authors integrated five machine learning methods—linear regression, neural network regression, Bayesian linear regression, and boosted decision tree regression—into the MIKE-11 hydrologic forecasting model developed by the Danish Hydraulic Institute. This research aims to provide more reliable flood predictions, contributing to better flood management strategies in urban areas.

Sediment transport is crucial for river ecosystems, replenishing nutrients and supporting aquatic habitats. Accurate prediction of sediment transport is essential for various applications, including flood forecasting and water supply planning. While traditional process-driven models face validation challenges, data-driven models, particularly those leveraging AI techniques like machine learning (ML) and deep learning, offer promising alternatives. These recent advancements aim to develop more robust models that can effectively address the complexities of sediment transport. Goldstein et al. [14] conducted a review of machine learning applications in coastal sediment transport and morphodynamics. The study explored how machine learning (ML) techniques can extract insights from complex datasets, focusing on supervised regression tasks. The authors analyzed the scientific problems addressed by ML, the insights gained, and the motivations for employing these methods. Their findings reveal a wide range of research questions, from small-scale sediment transport predictions to larger-scale analyses of sand bar morphodynamics and coastal overwash. They highlight the advantages of using ML, such as improved predictability, model emulation, and the ability to incorporate uncertainty. The review also outlines best practices for coastal researchers utilizing ML and suggests future research directions, including the application of novel ML techniques and the utilization of increasingly available open data.

Afan [3] reviewed the development of artificial intelligence models for sediment transport prediction, highlighting the evolution and prospects of these technologies. Building on this foundation, Khan et al. [22] assessed soft computing techniques for estimating suspended sediment loads in rivers, while Zounemat-Kermani et al. [51] examined the complexities of sediment load modeling using integrative machine learning, focusing on the Loíza River in Puerto Rico. Expanding this research, Lund et al. [30] utilized machine learning to improve predictions of fluvial sediment transport, crucial for addressing environmental issues such as flooding and habitat degradation. They developed extreme gradient boosting models using data from the U.S. Geological Survey in Minnesota, analyzing around 400 watershed and streamflow features and narrowing them to 30 key variables. Their findings underscored the importance of watershed and catchment characteristics in enhancing prediction accuracy. Together, these studies demonstrate the significant potential of machine learning in sediment transport modeling, offering valuable insights for effective water and landscape management.

1.4. Category 4: assessing the impact of climate change, drought monitoring and management

Environmental challenges like climate change and ecosystem

destruction pose significant threats to humanity and the planet, necessitating sustainable resource management and enhanced efficiency. Artificial intelligence (AI) and machine learning (ML) technologies present promising solutions by leveraging weather and hydrological data to forecast drought conditions and inform effective management strategies. Machine learning techniques have been increasingly applied to drought monitoring. Zhang et al. [49] employed the gradient boosting machine (GBM) and the extreme randomized tree (ERT) algorithm for nationwide drought assessment in China. Kaur et al. [23] utilized artificial neural networks (ANN), support vector machines (SVM), and random forests (RF) to predict drought. Hanadé Houmma et al. [18] integrated the vegetation condition index (VCI), the temperature condition index (TCI), and other remote sensing indices for drought monitoring. While machine learning has enhanced data mining and prediction accuracy compared to traditional methods, the growing volume of remote sensing data and complex drought factors present challenges for extracting comprehensive information. Park et al. [37] used machine learning to assess drought by integrating multi-sensor indices from MODIS and TRMM. They analyzed meteorological and agricultural drought during 2000-2012, employing random forest, boosted regression trees, and Cubist. Land surface factors (LST, ET) proved more significant for short-term drought, while vegetation indicators (NDVI, NMDI) were crucial for long-term assessment. This study demonstrates the effectiveness of machine learning in enhancing drought monitoring and assessment. Han et al. [17] developed a novel combined drought monitoring index (CDMI) using multi-sensor remote sensing data and machine learning. Recognizing the complex interactions among precipitation, temperature, evapotranspiration, and vegetation, they employed random forest analysis. The CDMI effectively monitored drought conditions in Shaanxi Province, demonstrating strong correlations with SPI and RSM compared to other indices. This study highlights machine learning's potential for developing effective drought monitoring tools without a deep understanding of causal mechanisms.

To summarize, the integration of artificial intelligence (AI) and machine learning (ML) applications is crucial for optimizing water treatment and quality monitoring, enhancing water consumption tracking, and improving water allocation strategies. These technologies play a significant role in groundwater management, river engineering, and flood management, particularly in the context of climate change. They facilitate effective drought monitoring and management by analyzing complex datasets and identifying patterns that traditional methods may overlook. While AI and ML offer substantial benefits, such as increased predictive accuracy and automation, challenges remain, including data quality concerns and the need for extensive computational resources. Addressing these drawbacks is essential for maximizing the potential of AI and ML in water resource management. By reviewing previous studies, it becomes evident that there is a lack of fundamental research on artificial intelligence (AI) and machine learning (ML) in hydraulic and water resources engineering, highlighting both challenges and opportunities. Therefore, conducting a comprehensive study to investigate the key challenges of AI, the role of AI in addressing water shortages and access to clean water, and considerations for using AI in water management is crucial. Such a study would significantly enhance our

understanding of AI and ML performance and help optimize the design, operation, and management of hydraulic and water resource systems. This investigation complements prior research and aims to deepen our understanding of the challenges and opportunities presented by AI and ML. Ultimately, this research addresses a vital aspect of how AI and ML can serve as promising tools for water resource management, offering numerous potential benefits, including more accurate predictions of water availability, enhanced management of water infrastructure, and improved water quality monitoring, thereby contributing significantly to global efforts to combat water scarcity.

2. Opportunities and challenges of artificial intelligence

As water scarcity, climate change, and environmental concerns escalate, hydraulic and water resources engineering is crucial for ensuring efficient water management. With growing water challenges, AI technologies offer essential tools for process optimization and informed decision-making. The application of artificial intelligence (AI) and machine learning (ML) in water resource management presents a transformative opportunity to enhance efficiency, accuracy, and sustainability across various domains. From improving water treatment and quality monitoring to enabling precise water allocation and flood management, the potential benefits of AI are vast. However, the implementation of AI in various facets of hydraulic engineering and water resources management encounters several challenges. Understanding these obstacles and developing effective solutions is essential to harness the full potential of AI in promoting efficient water resource management. This section discusses various studies on the opportunities and challenges of AI in hydraulic engineering and water resources management. A general summary of these findings is then categorized.

Xie et al. [46] enhanced real-time prediction of effluent water quality in wastewater treatment plants (WWTPs) by developing a machine learning model that combines an improved feedforward neural network (IFFNN) with an optimization algorithm. This hybrid approach effectively simplifies wastewater treatment modeling and improves predictive accuracy but faces limitations, such as reliance on controlled laboratory data and the inability to incorporate historical effluent inputs. The authors emphasized the need for adaptive neural networks to address real-world complexities. Ray et al. [38] reviewed the transformative role of artificial intelligence (AI) in water treatment and seawater desalination, highlighting its ability to enhance data processing, optimization, and decision-making. They noted advantages like improved efficiency and cost-effectiveness but also pointed out challenges regarding data reliability and the absence of comprehensive processing guidelines, indicating a need for clearer frameworks. Osman et al. [35] focused on machine learning's application in enhancing membrane efficiency for processes like reverse osmosis. They noted significant advancements in pollutant removal and the use of optical coherence tomography for monitoring fouling. However, they acknowledged limitations in continuous monitoring and suggested that deep neural network models could improve predictive insights. Abba [1] developed an evolutionary data intelligence model to predict

the performance of the Tamburawa water treatment plants in Nigeria. They emphasized the advantages of data-driven models, such as artificial neural networks (ANN) and support vector machines (SVM), but highlighted that no single modeling method fits all due to the complexity of hydro-environmental data. Lowe et al. [29] explored AI and ML applications in analyzing water quality data from diverse sources, noting their versatility in tasks like chlorination and membrane filtration. While these technologies can optimize processes, the authors identified challenges, including the need for reliable data and further development before real-world implementation.

Drogkoula [9] provided an overview of machine learning (ML) methodologies in water resource management, exploring how AI enhances data integration, decision-making, and sustainability. They noted ML's potential to improve efficiency but identified challenges such as data heterogeneity, the need for stakeholder education, high implementation costs, and issues with data quality. Additionally, the interpretability of ML models is a concern, particularly for supervised learning, which requires substantial labeled datasets. Nguyen et al. [33] evaluated the use of AI in forecasting the surface quality index of irrigation systems in the Red River Delta, Vietnam. They highlighted the advantages of machine learning and deep learning in managing nonlinear water quality relationships and handling large datasets, although challenges related to data quality, historical data needs, and implementation complexity persist. Goap et al. [13] focused on optimizing water resource utilization in precision farming through ML algorithms. Their proposed open-source smart system integrates data from various sources—such as remote sensing and soil moisture sensors—to enhance irrigation decision-making and promote efficient water usage. Singh et al. [40] introduced an automated ML model for predicting groundwater levels, emphasizing its ability to optimize hyperparameters and select the best-performing algorithm. They noted that ML addresses the limitations of traditional numerical modeling and remote sensing, demonstrating versatility in predicting various aspects of groundwater dynamics, including water quality indices and river flow.

Letessier et al. [28] introduced the Adaptive Structure of the Group Method of Data Handling (ASGMDH), a novel machine learning method designed to predict daily river flow rates using historical discharge data and real-time meteorological information. The study aimed to enhance prediction accuracy for applications like flood forecasting and irrigation planning. The advantages of ASGMDH include its ability to integrate diverse data sources and capture complex nonlinear relationships, outperforming traditional physical models. However, challenges such as extensive data preprocessing, parameter selection difficulties, and model interpretability were noted, along with the resource demands of traditional numerical models. Kumar et al. [26] examined challenges in flood prediction, focusing on data accessibility, ML model interpretability, and ethical considerations. They highlighted the advantages of AI and ML in processing high-dimensional and spatiotemporal data for improved predictions and early flood warnings. However, significant drawbacks include traditional models' struggles with nonlinear interactions, issues of overfitting in AI models, and the complexity of deep learning hindering interpretability. The authors stressed the need for future rese-

arch to enhance the robustness of AI and ML applications in flood prediction. Huu Duy et al. [19] developed a theoretical framework combining machine learning, hydrodynamic modeling, and the analytic hierarchy process to assess flood risk downstream of the Ba River in Phu Yen. This approach allows for analyzing complex data from various sources, enabling accurate predictions of high-risk areas while automating the analysis process. However, the lack of universal guidelines for selecting appropriate machine learning algorithms for different regions and the reliance on high-quality data present challenges.

Wang and Chen [44] evaluated the application of ML in reservoir engineering, highlighting its potential to enhance accuracy and efficiency in tasks such as production prediction and reservoir characterization. Key advantages include the ability to process large datasets and automate tasks, although challenges remain. The authors noted difficulties in handling multiple data formats, reliance on high-quality data, and a lack of integration with physical laws, which can hinder model generalization and interpretability. They called for further research to enhance ML effectiveness in this field. Latif et al. [27] focused on sediment load prediction in the Johor River, comparing deep learning and ML models. They emphasized that AI algorithms can bypass complex physical processes and adapt through self-learning, making them efficient for time series forecasting. However, the study also pointed out significant drawbacks, such as the potential inadequacies of search techniques and concerns regarding the reliability of black box models in capturing long-term dependencies in historical datasets.

Nandgude et al. [32] emphasized the importance of extensive datasets, appropriate model selection, and computing resources for effective drought prediction. They noted that ML and deep learning techniques can identify drought impacts more efficiently than traditional methods, improving response times. However, challenges such as data unavailability and the variable performance of artificial neural networks (ANNs) were also highlighted. Mardian et al. [31] evaluated a machine-learning framework for the Canadian Drought Monitor (CDM), aiming to automate drought impact monitoring without ground support, especially in data-limited regions. Their approach benefits from learning relationships from training data and effectively utilizing big data, though it faces challenges related to data quality and the need for extensive training datasets. Zhang et al. [48] developed an integrated drought monitoring model using deep learning algorithms, which can extract valuable features from various drought factors, enhancing effectiveness. However, they also pointed out the necessity for substantial data and computational resources, which complicates implementation. Together, these studies underscore both the potential and challenges of using AI and ML in drought prediction and management. They stated further research is needed to address these limitations and fully leverage machine learning for effective drought monitoring. Shen and Lawson [41] explored the applications of deep learning (DL) in hydrology. Deep learning has transitioned from a niche tool to a preferred method for various prediction tasks, offering capabilities akin to traditional hydrologic models, including dynamical modeling and forecasting. Long short-term memory (LSTM) networks have demonstrated exceptional performance in capturing data dynamics, often surpassing traditional mo-

dels, even in small-data scenarios, though caution is advised for critical applications. In subsurface hydrology, physics-informed machine learning approaches have emerged, integrating physical equations into neural network designs to facilitate training with limited data. The authors suggest that a deeper integration of domain knowledge and machine learning could enhance both prediction accuracy and understanding in hydrology, despite the current scarcity of interpretive machine-learning applications in the field.

Following a review of several studies, an overview of the key opportunities that AI offers in optimizing water resources and the profound impact these technologies can have on ensuring sustainable water management is highlighted below.

- **Water Supply and Distribution:** Designing systems to efficiently deliver potable water to communities. This includes the management of pipelines, treatment facilities, and distribution networks.
- **Wastewater Management:** Engineering solutions for the treatment and disposal of wastewater to protect public health and the environment. This involves designing treatment plants and implementing advanced treatment technologies.
- **Stormwater Management:** Developing systems to manage runoff during rainfall events, preventing flooding and water pollution. This includes green infrastructure solutions such as permeable pavements and retention basins.
- **Irrigation Engineering:** Designing irrigation systems that maximize agricultural productivity while minimizing water waste. This involves the use of modern technologies such as drip irrigation and automated control systems.
- **Hydrology:** Studying the movement, distribution, and quality of water in the environment. This includes modeling hydrological processes to predict water availability and assess flood risks.
- **Data-Driven Decision Making:** Utilizing AI algorithms to analyze large datasets to inform management decisions, improve predictive accuracy, and optimize resource allocation.
- **Real-Time Monitoring:** Implementing sensor networks and IoT technologies that provide real-time data on water quality and quantity, enabling proactive management responses.
- **Predictive Modeling:** Developing advanced models that simulate water system behavior under various scenarios, helping engineers design more resilient infrastructure and respond effectively to changing conditions.
- **Automation and Control:** Employing AI-driven automation in water treatment and distribution systems to enhance efficiency, reduce operational costs, and minimize human error.
- **Infrastructure Optimization:** Applying AI to optimize the design and maintenance of river infrastructures, such as levees and dams, enhancing their resilience to extreme weather events.
- **Demand Forecasting:** Leveraging machine learning algorithms to analyze historical consumption patterns and predict future water demand more accurately.
- **Smart Water Management:** Implementing IoT devices and

AI analytics to optimize water distribution networks, minimizing losses and ensuring equitable allocation.

- **User Behavior Analysis:** Utilizing AI to analyze consumer behavior patterns, enabling targeted interventions to promote water conservation among users.

On the other hand, some major challenges and their solutions are highlighted. These include a clear description of the challenges of artificial intelligence (AI) in various areas of water resource management, including optimizing water treatment, monitoring, and managing resources effectively.

- **Data Quality:** Data quality is crucial for AI model performance. Inaccurate or incomplete data can compromise prediction reliability. Implementing robust data cleaning and validation protocols is essential to ensure data quality and optimize AI model training. Also, Accurate predictions require high-resolution data, which can be limited. Collaborative data sharing among agencies and stakeholders can improve data availability and enhance modeling accuracy.
- **Data Accessibility:** Comprehensive dataset accessibility can be a challenge, especially in under-monitored regions. Investing in advanced monitoring technologies (e.g., IoT sensors) can enhance data availability and provide real-time insights.
- **Integration of Data Sources:** Integrating data from diverse sources (sensors, lab tests) can be challenging due to differing formats and standards. Establishing standardized formats and protocols for data collection can streamline data integration and enhance the effectiveness of AI and ML applications.
- **Non-stationarity, or changing data patterns over time,** poses significant challenges for AI models in dynamic fields like hydrology. Climate change, land use changes, and evolving environmental conditions contribute to non-stationarity. To address these challenges, incorporating domain knowledge into AI model development is crucial. By integrating physical principles and process understanding, practitioners can enhance model robustness, improve predictive accuracy, and make informed decisions in changing environments.
- **Model Interpretability and Expanding:** AI models can often be indistinct, making it difficult to understand their decision-making processes. This lack of transparency can hinder regulatory compliance. Explainable AI techniques can address this by improving model interpretability, fostering stakeholder trust, and ensuring compliance. Also, AI models trained on specific datasets may face challenges when applied to new regions or conditions. Transfer learning techniques can help address this by adapting models to perform well in different contexts. Furthermore, The complexity of phenomena arises from the interplay of numerous variables. Multi-scale modeling approaches can help capture these interactions and improve predictive accuracy.
- **Adaptability of Models:** AI models must adapt to changing conditions. Continuous learning systems can enable models to learn from new data and evolve, ensuring long-term reliability.

- **Stationarity Of Models:** Non-stationarity, or changing data patterns over time, poses significant challenges for AI models in dynamic fields like hydrology. Climate change, land use changes, and evolving environmental conditions contribute to non-stationarity. To address these challenges, incorporating domain knowledge into AI model development is crucial. By integrating physical principles and process understanding, practitioners can enhance model robustness, improve predictive accuracy, and make informed decisions in changing environments.
- **Cost:** Real-time management requires efficient data processing, which can be computationally demanding. Cloud computing solutions offer the necessary processing power to enable real-time data analysis. Also, Developing and implementing AI systems can be expensive, especially when considering the costs of data acquisition, system integration, and ongoing maintenance.
- **Long-Term Data Needs:** Long-term data is crucial for effective assessments, but availability can be inconsistent across regions. Centralized repositories for historical data can improve accessibility and support research and model training.
- **Inherent complexity of water systems:** Water systems are complex, and influenced by both natural and human factors. This complexity hinders the development of accurate models, leading to potentially ineffective management solutions. Addressing this requires integrated models that consider hydrological, ecological, and socioeconomic components. Collaboration among scientists, policymakers, and communities is crucial for sharing knowledge and data. Investing in training programs can enhance stakeholder understanding of water systems and improve model input and interpretation.

While AI and ML hold great promise for advancing water resource management, overcoming the associated challenges is crucial for effective implementation. By addressing issues related to data quality, accessibility, model interpretability, and computational demands, stakeholders can maximize the benefits of AI technologies. Implementing the proposed solutions can foster a more sustainable approach to managing water resources, ultimately contributing to global efforts in combating water scarcity and ensuring clean water access for all.

3. Considerations of using artificial intelligence

Firstly, data quality is paramount in artificial intelligence. High-quality data enhances model performance, accuracy, and reliability, fostering trust and confidence. Addressing biases within data is crucial to prevent their perpetuation in AI-generated outputs. Diverse and representative datasets improve an AI model's ability to generalize across various contexts, ensuring its relevance and effectiveness. Data maintaining quality is essential for realizing AI's full potential, driving innovation, and ensuring ethical outcomes. The question is what are the key components of quality data in AI?

Data quality is a cornerstone of AI success. Accurate, consistent, complete, and timely data ensures reliable AI outcomes. Errors in data can lead to incorrect decisions, while inconsistent for-

mats hinder efficient processing. Incomplete data limits pattern recognition, and outdated data may not reflect current trends. Relevance is key, as irrelevant data can clutter models and reduce efficiency. By prioritizing data quality, organizations can optimize AI performance, foster trust, and avoid potential pitfalls. Data governance, tools, and team collaboration are essential for ensuring data quality in AI. A robust data governance framework, data quality tools, and a dedicated team can create a culture of data quality and ensure consistent access to high-quality data. Collaborating with data providers and continuously monitoring data quality metrics can further minimize risks and optimize AI performance.

Data processing, secondly, is a critical component of any AI application. Once relevant data is gathered from diverse sources, effective data processing must be applied. Data preprocessing—cleaning, normalizing, and transforming data—is essential for preparing the dataset for modeling. Following preprocessing, data exploration and analysis are conducted to understand distributions, patterns, and relationships using visualization and statistical techniques. The dataset is then divided into training, validation, and testing sets to support model development and evaluation. Additionally, data augmentation techniques, such as image rotation or noise addition, can be employed to enhance data variety. By carefully addressing these data processing steps, organizations can ensure their AI models are trained on high-quality data, resulting in more accurate and reliable outcomes.

Thirdly, choosing the reliable AI model is crucial for success in today's fast-paced environment, as it significantly impacts performance, accuracy, and adaptability in real-world applications. Effective model selection is key to successful AI implementation. Practitioners must consider the type of problem, resource constraints, the need for interpretability, and the characteristics of the available data. By understanding these factors, they can develop systems that are accurate, efficient, and adaptable, unlocking AI's full potential. Moreover, AI systems should be designed to adapt to new data, evolving scenarios, and changes in their operating environment. This adaptability is vital for maintaining performance and relevance over time. Scalability is also essential, especially for larger projects, as it enables systems to manage increased data volumes and complexity without sacrificing efficiency. By prioritizing both adaptability and scalability, AI practitioners can create robust systems that excel in dynamic environments.

After selecting the appropriate AI model, evaluating its performance using the right metrics is crucial. Choosing suitable evaluation metrics—such as accuracy, precision, and recall—helps assess model effectiveness and determine its impact. Establishing clear performance metrics is essential for making necessary adjustments and improvements. Continuous monitoring is also vital, as ongoing assessment ensures that AI models remain effective as new data and conditions emerge. AI tools can sometimes produce outputs that are nonsensical or inaccurate, often referred to as „AI hallucinations.” Therefore, it is important for researchers and users to independently verify the accuracy of the outputs generated by AI systems, rather than relying solely on them. This approach promotes reliability and confidence in AI-generated results.

In addition, when developing machine learning models, particularly in dynamic fields like hydrology, it is crucial to consi-

der the challenges posed by non-stationarity. Non-stationarity refers to the changing statistical properties of a process over time, influenced by factors such as climate change, land use alterations, and evolving environmental conditions. This variability can significantly undermine the reliability of AI models, which often depend on historical data for predictions. As underlying data patterns shift, models trained on past data may struggle to deliver accurate forecasts, leading to potentially poor decision-making. To effectively address these challenges, it is essential to incorporate a robust understanding of the underlying processes into model development. By integrating domain knowledge, practitioners can impose better constraints on AI models, allowing them to adapt to variations in the data. Emphasizing physical principles and process understanding can enhance model robustness, improve predictive accuracy, and facilitate informed decision-making in the face of changing conditions. This approach not only aids in adapting to non-stationary environments but also promotes a more comprehensive understanding of the systems being modeled, ultimately leading to more effective applications of machine learning.

Environmental considerations, also, are crucial when implementing artificial intelligence (AI) in water management, as its use can lead to significant ecological consequences if not approached sustainably. While AI has the potential to optimize water consumption, improper management may result in excessive extraction or pollution of water resources, causing negative environmental impacts. Key aspects of environmental considerations include sustainable implementation, energy consumption, and impact on biodiversity, as well as long-term effects. Sustainable implementation is vital; AI solutions must be designed to prevent over-extraction of water resources that can harm ecosystems. Additionally, AI algorithms, especially those requiring substantial computational power, can consume significant amounts of energy, potentially increasing the carbon footprint of water management practices. Poorly managed AI applications may also disrupt local habitats or threaten species by altering water availability and quality. While AI can provide short-term optimizations, it is essential to consider its long-term ecological impacts to ensure sustainable water management practices. To minimize the environmental footprint of AI in water resources management, several strategies can be adopted, including utilizing renewable energy, optimizing algorithm efficiency, implementing resource-efficient practices, monitoring environmental impacts, promoting green computing, and supporting ecosystem health. By integrating these strategies, AI can be harnessed for more sustainable and effective water resource management.

Furthermore, regulatory compliance is critical when implementing AI systems. These systems must adhere to legal regulations and industry standards, particularly concerning data protection and safety. Ensuring compliance mitigates legal risks and fosters trust among users and stakeholders. By integrating compliance considerations into the development and deployment of AI, organizations can safeguard sensitive information and maintain ethical standards, thereby promoting responsible and sustainable AI use.

Moreover, both ethical and social considerations must be addressed in the use of artificial intelligence in water management. The collection and analysis of sensitive water consumption data raise important privacy and security concerns, making it essen-

tial to establish appropriate ethical guidelines to protect the rights of individuals and communities. Key ethical considerations include privacy, informed consent, data security, transparency, equity, accuracy, integrity, environmental impact, and regulatory compliance. In addition to ethical concerns, the implementation of AI in water management can have significant social impacts, particularly regarding job displacement. AI may automate tasks previously performed by human workers, potentially leading to job losses and an increased need for reskilling and retraining. To mitigate these negative effects, it is crucial to develop reskilling programs that assist affected workers in transitioning to new roles in emerging fields. These programs should provide training and support for acquiring skills in high-demand areas such as data analysis, programming, and AI development. Collaboration among governments, organizations, and educational institutions is vital to ensure these programs are accessible and inclusive for all workers.

4. Optimization techniques based on artificial intelligence

Artificial intelligence-based optimization techniques for water resources management involve utilizing machine learning and other AI algorithms to analyze and optimize the allocation and distribution of water within a system. These techniques enhance the efficiency of water management, reduce waste, and ensure that water resources are managed in an environmentally sustainable manner. Some key techniques in water resource management include [2, 16, 36, 42]:

- Machine learning algorithms are employed to create predictive models that forecast water demand and optimize the allocation and distribution of water resources.
- Deep learning techniques, such as Convolutional Neural Networks (CNN) and Recurrent Neural Networks (RNN), are used to analyze large datasets and make predictions about water consumption and distribution.
- Genetic algorithms optimize water allocation and distribution by generating a set of rules that guide decision-making processes, ensuring efficient resource management.
- Reinforcement learning involves using machine learning algorithms to learn from experience, improving decision-making capabilities over time as the system adapts to new data and scenarios.
- Multi-objective optimization techniques are used to balance conflicting objectives, such as maximizing water availability while minimizing environmental impacts. These methods help in finding the best possible solutions that address multiple goals simultaneously.
- Real-time monitoring and decision-making involve using AI-based techniques to continuously monitor water consumption and distribution. This real-time data allows for rapid decision-making and optimization, ensuring that water management practices are both efficient and responsive to changing conditions.
- Decision Trees are a widely-used machine learning algorithm for solving classification and regression problems, especially in allocation and optimization. In water distribution, decision trees can identify the most critical factors influencing the allocation and distribution of water resources.

ces. This analysis can inform the development of decision support systems, enabling water managers to make more informed decisions about allocating and distributing water resources efficiently.

- Support Vector Machines (SVMs) are a popular machine learning algorithm used for solving classification and regression problems in optimizing water allocation and distribution. SVMs can predict water demand based on various factors such as population, climate, and land use. This information can then be used to optimize the allocation and distribution of water resources in a specific area.
- Artificial Neural Networks (ANNs) are a widely-used machine learning algorithm inspired by the structure and function of the human brain. In the context of optimizing water allocation and distribution, ANNs can predict water demand based on factors like population, climate, and land use. This information can then be utilized to optimize the allocation and distribution of water resources within a particular area.
- The K-Nearest Neighbors (KNN) algorithm is a simple yet powerful machine learning technique used to solve classification and regression problems in optimizing water allocation and distribution. KNN can predict water demand based on various factors such as climate, population, and land use. This information can then be used to optimize the allocation and distribution of water resources within a specific area.
- Clustering is a machine learning technique used to group similar data points, which is particularly useful in the allocation and optimization of water distribution. By clustering areas with similar water demand patterns, this information can be used to optimize the allocation and distribution of water resources across different regions.

5. Conclusions

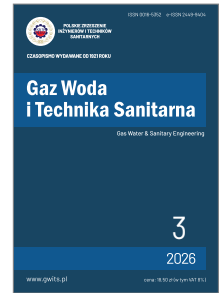
In recent years, the rise of artificial intelligence (AI) has established it as a vital technology in hydraulic and water resources engineering, especially as urbanization and population growth intensify water demand. AI offers transformative solutions across various applications, including optimizing water treatment processes, monitoring water quality, tracking consumption, managing groundwater resources, and addressing hydrological challenges like climate change. While the integration of AI and machine learning (ML) in water resource management presents significant opportunities for enhancing efficiency, accuracy, and sustainability, it also faces various challenges that must be understood and addressed. Developing effective solutions to these obstacles is crucial for fully leveraging AI's potential to improve water resource management practices. This essay emphasizes the transformative potential of integrating artificial intelligence (AI) into hydraulic and water resource management, particularly in optimizing water distribution. By accurately simulating water behavior and predicting essential parameters, such as pressure and flow, AI enhances traditional models that depend on extensive data and computational resources. Its applications extend to managing water quality, forecasting floods, simulating groundwater dynamics, improving irrigation practices, detecting leaks, and optimizing desalination processes. However, several

challenges must be addressed. Data quality is crucial for AI model success, as inaccuracies can undermine prediction reliability. Establishing robust data cleaning and validation protocols, along with fostering collaboration among stakeholders, is essential to enhance data availability and modeling accuracy. In under-monitored areas, advanced technologies like IoT sensors can provide real-time insights, while standardized data collection protocols facilitate the integration of diverse sources. The dynamic nature of hydrology, shaped by factors like climate change, requires incorporating domain knowledge into AI model development for improved adaptability. While AI and machine learning (ML) offer significant potential for enhancing water resource management, it is essential to overcome the associated challenges for effective implementation. By addressing these challenges, stakeholders can fully maximize the benefits of AI technologies. Implementing the proposed solutions will promote a more sustainable approach to managing water resources, ultimately contributing to global efforts to combat water scarcity and ensure access to clean water for all.




6. References

- [1] Abba, S. I., Pham, Q. B., Usman, A. G., Linh, N. T. T., Aliyu, D. S., Nguyen, Q., & Bach, Q. V. (2020). Emerging evolutionary algorithm integrated with kernel principal component analysis for modeling the performance of a water treatment plant. *Journal of Water Process Engineering*, 33, 101081. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2019.101081>
- [2] Abdolrasol, M. G., Hussain, S. S., Ustun, T. S., Sarker, M. R., Hannan, M. A., Mohamed, R., Ali, J. A., Mekhilef, S., & Milad, A. (2021). *Artificial neural networks based optimization techniques: A review*. *Electronics*, 10(21), 2689. <https://doi.org/10.3390/electronics10212689>
- [3] Afan, H. A., El-Shafie, A., Mohtar, W. H. M. W., & Yaseen, Z. M. (2016). Past, present and prospect of an artificial intelligence based model for sediment transport prediction. *Journal of Hydrology*, 541, 902–913. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2016.07.048>
- [4] Al Aani, S., Bonny, T., Hasan, S. W., & Hilal, N. (2019). Can machine language and artificial intelligence revolutionize process automation for water treatment and desalination? *Desalination*, 458, 84–96. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2019.02.005>
- [5] Ahmed, A. A., Sayed, S., Abdoulhalik, A., Moutari, S., & Oyedele, L. (2024). Applications of machine learning to water resources management: A review of present status and future opportunities. *Journal of Cleaner Production*, 140715. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.140715>
- [6] Chang, F. J., Chang, L. C., & Chen, J. F. (2023). Artificial intelligence techniques in hydrology and water resources management. *Water*, 15(10), 1846. <https://doi.org/10.3390/w15101846>
- [7] Ding, F., Zhang, W., Cao, S., Hao, S., Chen, L., Xie, X., Li, W., & Jiang, M. (2023). Optimization of water quality index models using machine learning approaches. *Water Research*, 243, 120337. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2023.120337>
- [8] Doorn, N. (2021). Artificial intelligence in the water domain: Opportunities for responsible use. *Science of the Total Environment*, 755, 142561. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.142561>
- [9] Drogkoula, M., Kokkinos, K., & Samaras, N. (2023). A comprehensive survey of machine learning methodologies with emphasis in water resources management. *Applied Sciences*, 13(22), 12147. <https://doi.org/10.3390/app132212147>
- [10] Ekwueme, B. N. (2022). Machine learning based prediction of urban flood susceptibility from selected rivers in a tropical catchment area. *Civil Engineering Journal*, 8(9), 1857–1872. <https://doi.org/10.28991/CEJ-2022-08-09-08>
- [11] Filo, G. (2023). Artificial intelligence methods in hydraulic system design. *Energies*, 16(8), 3320. <https://doi.org/10.3390/en16083320>
- [12] Ghobadi, F., & Kang, D. (2023). Application of machine learning in water resources management: A systematic literature review. *Water*, 15(4), 620. <https://doi.org/10.3390/w15040620>
- [13] Goap, A., Sharma, D., Shukla, A. K., & Krishna, C. R. (2018). An IoT based smart irrigation management system using machine learning and open source technologies. *Computers and Electronics in Agriculture*, 155, 41–49. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2018.09.040>
- [14] Goldstein, E. B., Coco, G., & Plant, N. G. (2019). A review of machine learning applications to coastal sediment transport and morphodynamics. *Earth-Science Reviews*, 194, 97–108. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2019.04.022>
- [15] Goralski, M. A., & Tan, T. K. (2020). Artificial intelligence and sustainable development. *The International Journal of Management Education*, 18(1), 100330. <https://doi.org/10.1016/j.ijme.2019.100330>
- [16] Guido, R., Ferrisi, S., Lofaro, D., & Conforti, D. (2024). An overview on the advancements of support vector machine models in healthcare applications: A review. *Information*, 15(4), 235. <https://doi.org/10.3390/info15040235>
- [17] Han, H., Bai, J., Yan, J., Yang, H., & Ma, G. (2021). A combined drought monitoring index based on multi-sensor remote sensing data and machine learning. *Geocarto International*, 36(10), 1161–1177. <https://doi.org/10.1080/10106049.2019.1633423>
- [18] Hanadé Houmma, I., El Mansouri, L., Gadal, S., Mamane Barkawi, M. B., & Hadria, R. (2022). Prospective analysis of spatial heterogeneity influence on the concordance of remote sensing drought indices. *Geocarto International*, 37(27), 14899–14924. <https://doi.org/10.1080/10106049.2022.2092219>
- [19] Huu Duy, N., Tuan Pham, L., Xuan Linh, N., Van Truong, T., Dang, D. K., Quang Hai, T., & Bui, Q. T. (2024). Flood risk assessment using machine learning, hydrodynamic modelling, and the analytic hierarchy process. *Journal of Hydroinformatics*, 26(8), 1852–1882. <https://doi.org/10.2166/hydro.2024.033>
- [20] Jawad, J., Hawari, A. H., & Zaidi, S. J. (2021). Artificial neural network modeling of wastewater treatment and desalination using membrane processes: A review. *Chemical Engineering Journal*, 419, 129540. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2021.129540>
- [21] Kabir, S., Patidar, S., & Pender, G. (2021, February). A machine learning approach for forecasting and visualising flood inundation information. In *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Water Management* (Vol. 174, No. 1, pp. 27–41). Thomas Telford Ltd. <https://doi.org/10.1680/jwama.20.00002>
- [22] Khan, M. A., Stamm, J., & Haider, S. (2021). Assessment of soft computing techniques for the prediction of suspended sediment loads in rivers. *Applied Sciences*, 11(18), 8290. <https://doi.org/10.3390/app11188290>
- [23] Kaur, A., & Sood, S. K. (2020). Deep learning based drought assessment and prediction framework. *Ecological Informatics*, 57, 101067. <https://doi.org/10.1016/j.ecoinf.2020.101067>
- [24] Kavya, M., Mathew, A., Shekar, P. R., & Sarwesh, P. (2023). Short term water demand forecast modelling using artificial intelligence for smart water management. *Sustainable Cities and Society*, 95, 104610. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2023.104610>
- [25] Krishnan, S. R., Nallakaruppan, M. K., Chengoden, R., Koppu, S., Iyapparaja, M., Sadhasivam, J., & Sethuraman, S. (2022). Smart water resource management using artificial intelli-

- gence—A review. *Sustainability*, 14(20), 13384. <https://doi.org/10.3390/su142013384>
- [26] Kumar, V., Azamathulla, H. M., Sharma, K. V., Mehta, D. J., & Maharaj, K. T. (2023). Deep learning applications for flood forecasting and management: A review. *Sustainability*, 15(13), 10543. <https://doi.org/10.3390/su151310543>
- [27] Latif, S. D., Chong, K. L., Ahmed, A. N., Huang, Y. F., Sherif, M., & El-Shafie, A. (2023). Sediment load prediction in Johor river: Deep learning versus machine learning models. *Applied Water Science*, 13(3), 79. <https://doi.org/10.1007/s13201-023-01874-w>
- [28] Letessier, C., Cardi, J., Dussel, A., Ebtehaj, I., & Bonakdari, H. (2023). Enhancing flood prediction accuracy through integration of meteorological parameters in river flow observations. *Hydrology*, 10(8), 164. <https://doi.org/10.3390/hydrology10080164>
- [29] Lowe, M., Qin, R., & Mao, X. (2022). A review on machine learning, artificial intelligence, and smart technology in water treatment and monitoring. *Water*, 14(9), 1384. <https://doi.org/10.3390/w14091384>
- [30] Lund, J. W., Groten, J. T., Karwan, D. L., & Babcock, C. (2022). Using machine learning to improve predictions and provide insight into fluvial sediment transport. *Hydrological Processes*, 36(8), e14648. <https://doi.org/10.1002/hyp.14648>
- [31] Mardian, J., Champagne, C., Bonsal, B., & Berg, A. (2023). A machine learning framework for predicting and understanding the Canadian drought monitor. *Water Resources Research*, 59, e2022WR033847. <https://doi.org/10.1029/2022WR033847>
- [32] Nandgude, N., Singh, T. P., Nandgude, S., & Tiwari, M. (2023). Drought prediction: A comprehensive review of different drought prediction models and adopted technologies. *Sustainability*, 15(15), 11684. <https://doi.org/10.3390/su151511684>
- [33] Nguyen, D. P., Ha, H. D., Trinh, N. T., & Nguyen, M. T. (2023). Application of artificial intelligence for forecasting surface quality index of irrigation systems in the Red River Delta. *Environmental Systems Research*, 12, 24. <https://doi.org/10.1186/s40068-023-00307-6>
- [34] Noymanee, J., & Theeramunkong, T. (2019). Flood forecasting with machine learning technique on hydrological modeling. *Procedia Computer Science*, 156, 377–386. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2019.08.214>
- [35] Osman, A. I., Nasr, M., Farghali, M., Bakr, S. S., Eltaweil, A. S., Rashwan, A. K., & Abd El-Monaem, E. M. (2024). Machine learning for membrane design in energy production, gas separation, and water treatment. *Environmental Chemistry Letters*, 22(2), 505–560. <https://doi.org/10.1007/s10311-023-01695-y>
- [36] Ozturk Kiyak, E., Ghasemkhani, B., & Birant, D. (2023). High-level k-nearest neighbors (HLKNN): A supervised machine learning model for classification analysis. *Electronics*, 12(18), 3828. <https://doi.org/10.3390/electronics12183828>
- [37] Park, S., Im, J., Jang, E., & Rhee, J. (2016). Drought assessment and monitoring through blending of multi-sensor indices using machine learning approaches. *Agricultural and Forest Meteorology*, 216, 157–169. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2015.10.011>
- [38] Ray, S. S., Verma, R. K., Singh, A., Ganesapillai, M., & Kwon, Y. N. (2023). A holistic review on how artificial intelligence has redefined water treatment and seawater desalination processes. *Desalination*, 546, 116221. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2022.116221>
- [39] Sit, M., Demiray, B. Z., Xiang, Z., Ewing, G. J., Sermet, Y., & Demir, I. (2020). A comprehensive review of deep learning applications in hydrology and water resources. *Water Science and Technology*, 82(12), 2635–2670. <https://doi.org/10.2166/wst.2020.369>
- [40] Singh, A., Patel, S., Bhadani, V., Kumar, V., & Gaurav, K. (2024). AutoML-GWL: Automated machine learning model for the prediction of groundwater level. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 127, 107405. <https://doi.org/10.1016/j.engappai.2023.107405>
- [41] Shen, C., & Lawson, K. (2021). Applications of deep learning in hydrology. In *Deep Learning for the Earth Sciences* (pp. 283–297). Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1002/9781119646181.ch19>
- [42] Swarnkar, A., & Swarnkar, A. (2019). Artificial intelligence based optimization techniques: A review. *Intelligent Computing Techniques for Smart Energy Systems: Proceedings of ICTSES 2018*, 95–103. https://doi.org/10.1007/978-981-15-0214-9_12
- [43] Taloba, A. I. (2022). An artificial neural network mechanism for optimizing the water treatment process and desalination process. *Alexandria Engineering Journal*, 61(12), 9287–9295. <https://doi.org/10.1016/j.aej.2022.03.029>
- [44] Wang, H., & Chen, S. (2023). Insights into the application of machine learning in reservoir engineering: Current developments and future trends. *Energies*, 16(3), 1392. <https://doi.org/10.3390/en16031392>
- [45] Wai, K. P., Chia, M. Y., Koo, C. H., Huang, Y. F., & Chong, W. C. (2022). Applications of deep learning in water quality management: A state-of-the-art review. *Journal of Hydrology*, 613, 128332. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2022.128332>
- [46] Xie, Y., Chen, Y., Lian, Q., Yin, H., Peng, J., Sheng, M., & Wang, Y. (2022). Enhancing real-time prediction of effluent water quality of wastewater treatment plant based on improved feedforward neural network coupled with optimization algorithm. *Water*, 14(7), 1053. <https://doi.org/10.3390/w14071053>
- [47] Zhang, Y., Li, C., Duan, H., Yan, K., Wang, J., & Wang, W. (2023). Deep learning based data-driven model for detecting time-delay water quality indicators of wastewater treatment plant influent. *Chemical Engineering Journal*, 467, 143483. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2023.143483>
- [48] Zhang, Y., Xie, D., Tian, W., Zhao, H., Geng, S., Lu, H., Ma, G., Huang, J., & Choy Lim Kam Sian, K. T. (2023). Construction of an integrated drought monitoring model based on deep learning algorithms. *Remote Sensing*, 15(3), 667. <https://doi.org/10.3390/rs15030667>
- [49] Zhang, Q., Shi, R., Singh, V. P., Xu, C. Y., Yu, H., Fan, K., & Wu, Z. (2022). Droughts across China: Drought factors, prediction and impacts. *Science of the Total Environment*, 803, 150018. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.150018>
- [50] Zekrif, D. M. S., Kulkarni, M., Bhagyalakshmi, A., Devireddy, N., Gupta, S., & Boopathi, S. (2023). Integrating machine learning and AI for improved hydrological modeling and water resource management. In *Artificial Intelligence Applications in Water Treatment and Water Resource Management* (pp. 46–70). IGI Global. <https://doi.org/10.4018/978-1-6684-6791-6.ch003>
- [51] Zounemat-Kermani, M., Mahdavi-Meymand, A., Alizamir, M., Adarsh, S., & Yaseen, Z. M. (2020). On the complexities of sediment load modeling using integrative machine learning. *Journal of Hydrology*, 585, 124759. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.124759>



Sustainable intentions vs. consumption paradoxes: young consumers' engagement with second-hand fashion and textile waste management Zrównoważone intencje a paradoksy konsumpcji: zaangażowanie młodych konsumentów w modę z drugiej ręki i zarządzanie odpadami tekstylnymi

Anna Mielniczek¹ , Weronika Urbańska^{1*} , Hubert Jamry¹ , Aneta Ceglińska¹

¹ Faculty of Environmental Engineering, Wrocław University of Science and Technology

* Kontakt / Correspondence: weronika.urbańska@pwr.edu.pl

Abstract:

This study explores the shopping behaviors of young textile consumers in the context of sustainable fashion. A survey conducted at Wrocław University of Science and Technology indicates a high level of awareness of the fashion industry's negative environmental impact. 80% of respondents purchase second-hand clothing, motivated mainly by financial and environmental reasons. However, many also discard unused textiles. Women shop second-hand more often but buy textiles more frequently and with less focus on quality. These paradoxes may reflect behavioral greenwashing, where sustainability coexists with overconsumption.

Keywords: fast-fashion, sustainable fashion, circular economy, textile waste, consumer behavior

Streszczenie:

Niniejsze badanie analizuje zachowania zakupowe młodych konsumentów tekstyliów w kontekście zrównoważonej mody. Ankieta przeprowadzona na Politechnice Wrocławskiej wskazuje na wysoki poziom świadomości negatywnego wpływu przemysłu modowego na środowisko. 80% respondentów kupuje odzież z drugiej ręki, kierując się głównie względami finansowymi i ekologicznymi. Jednocześnie wielu z nich wyrzuca nieużywane tekstylia. Kobiety częściej robią zakupy w second-handach, ale także częściej kupują tekstylia i rzadziej zwracają uwagę na ich jakość. Te paradoksy mogą odzwierciedlać zjawisko greenwashingu behawioralnego, w którym deklarowana troska o zrównoważony rozwój współistnieje z nadmierną konsumpcją.

Słowa kluczowe: fast fashion, zrównoważona moda, gospodarka o obiegu zamkniętym, odpady tekstylne, zachowania konsumentek

1. Introduction

Fashion, as a fundamental consumer good, holds a significant role in societal life. Beyond its aesthetic and protective functions, it serves as a medium for expressing identity, social belonging, and individual values. Clothing can reflect an individual's social status, beliefs, and even emotions. Over the past few decades, the fashion industry has undergone dynamic transition from the traditional approach to the fast-fashion model, which prioritizes rapid production and consumption cycles [1–2]. Clothing has transitioned from a durable utility product to a disposable commodity, heavily influenced by evolving trends and mass culture. Manufacturers' swift adaptation to market

demand has led to frequent releases of new collections at low prices [3]. However, short production cycles result in reduced textile quality and durability, consequently limiting clothing's lifespan. According to the UK Consumer Report [4], the average longevity of garments is approximately 3.3 years. Furthermore, data from the European Environment Agency indicates that global annual clothing consumption reached 62 million tons in 2019 and is projected to rise to 102 million tons by 2030 [5]. Ethical aspects of the fast-fashion model are also questionable, as cost-reduction strategies often rely on exploitative labor practices in developing countries. Unsafe working conditions, low or no pay, and violations of human and children's rights are common abuses recorded at the produc-

tion stage [6].

One of the most prominent environmental consequences of fast-fashion is the rapidly increasing volume of textile waste generated annually [7]. The reduced lifespan of low-quality textiles necessitates frequent repurchasing. As a result, textiles very quickly turn into a waste stream. Moreover, textile waste is generated at multiple stages of the product lifecycle, including production and retail. Overproduction and frequent replacement of collections contribute to the disposal of unsold or withdrawn garments. The textile sector has the fourth largest impact on climate change, mainly due to the high carbon emissions and water consumption, usage of chemicals, and global transport [8–9]. During manufacturing, the textile industry utilizes over 8,000 different chemicals, including highly toxic substances with carcinogenic, mutagenic, and allergenic properties [10]. These chemicals enter industrial wastewater during production, and subsequently may contaminate ecosystems when inadequately treated [11]. In addition to chemical pollutants, textile microfibres - particularly microplastics - pose a significant risk, with their effects on human health still not fully understood [12]. Given these environmental concerns, the European Union (EU) has prioritized reforms within the fashion industry to mitigate its ecological footprint. The implementation of circular economy (CE) principles, particularly textile reuse and recycling, is essential for transitioning towards a slow-fashion model that emphasizes responsible and sustainable consumption [13–15]. Slow-fashion encourages consumers to make deliberate purchasing choices based on product quality, durability, and ecological considerations, while also promoting clothing repair, alteration, exchange, and resale [16–17].

In the fashion industry, consumers play a pivotal role in driving the transition towards a CE through their purchasing choices and ecological awareness [18]. However, existing literature highlights a pronounced gap between consumer awareness of sustainable fashion and its practical reflection in purchasing behavior [19]. This disparity is further exacerbated by the influence of mass media, as well as the widespread availability and affordability of clothing [20]. Therefore, fostering appropriate attitudes among young consumers is of particular importance, as they are the most susceptible to the fast-fashion paradigm. The social group known as “young adults”, while exhibiting a heightened awareness of ecological issues, particularly concerning climate change, tends to demonstrate relatively low levels of environmental responsibility and engagement in sustainability-oriented actions. Ecological considerations are often secondary in their purchasing decisions [21]. Nevertheless, a consumer study on sustainable fashion conducted in France, Germany, and the UK found that respondents aged 18–24 were significantly more inclined to select sustainable textiles compared to the broader population [22].

Recognizing the increasing significance of responsible textile consumption, this study aimed to evaluate consumer awareness and responsibility in both social and environmental dimensions. To achieve this objective,

a survey was conducted among a total of 969 members of the Wrocław University of Science and Technology community, focusing on young consumers aged 18 to 25. The questionnaire was structured into three thematic blocks, encompassing inquiries related to textile acquisition and disposal practices, as well as ecological awareness concerning the environmental impact of textile production and consumption. The findings of this study contribute to a deeper understanding of young consumer behavior and provide insights into the factors influencing their sustainable purchasing decisions.

2. Methodology

2.1. Respondent research

The research was carried out as part of a student’s project by the Environmental Team Science Club (ET). The research was conducted among the Wrocław University of Science and Technology community from May 9 to June 8, 2023, using a survey form in Polish created in Google Forms. The survey was shared on the social media of the Faculty of Environmental Engineering (FEE) and ET. Also, posters containing a QR code linking to the form and promoting the research were displayed around FEE buildings. The survey was anonymous in strict compliance with the privacy Policy and personal data protection. The total number of respondents was 969, and they were informed about the possibility of using and publishing the study results.

The initial part of the questionnaire contained 4 socio-demographic questions, including gender, age, place of residence, and education. The substantive part of the survey was divided into three thematic blocks, including consumer purchasing behaviour (block I), the textile industry’s impact on the environment (block II), and consumers’ textile waste behaviour (block III). The survey consisted mainly of closed-ended single-choice or multiple-choice questions with the possibility of selecting up to 3, exactly 3, or an unlimited number of answers. In selected questions, it was possible to enter one’s answer. Block II contained one matrix question with a five-point Likert scale. The total number of questions, depending on the answers indicated by the respondents in Block I, was 23 or 26.

The first block contained questions identifying the behaviour of consumers purchasing textiles and consisted of 9 or 12 questions. Respondents answered questions about the reasons for purchasing textiles as well as the frequency, preferred forms, and places of their purchases. The question “Do you buy second-hand (SH) textiles?” divided the respondents into two groups. The respondents who declared participation in textile second circulation (SC) answered 5 questions about the places where they purchase SH textiles, the main motivations and frequency of such purchases, and their limitations. The second group was asked 2 questions about the reasons why they do not participate in the SC of textiles and potential actions that could encourage them to change their decision.

The second block contained 4 questions regarding re-

spondents' knowledge about the textile industry's impact on the environment. Respondents stated whether and how the production and use of textiles negatively impact the environment. They also assessed the impact of individual stages of textile production and consumption on the natural environment on a five-point scale.

The third block contained 6 questions focusing on the textile waste aspect. Questions in this part concerned the reasons and methods of getting rid of textiles and the attitude of respondents to participate in selective textile waste collection.

2.2. Statistical analysis

The data analysis from the survey was carried out using Microsoft Excel computational tools. The data preparation stage included coding the responses, categorizing them, and creating a database in a format that allowed for further statistical processing. The results were analyzed using pivot table functions. Raw survey data were imported into a spreadsheet, and then variables for analysis were selected using available functions.

First, the focus was on analyzing the distribution of answers to individual questions. This allowed us to identify the most frequently chosen answers and general trends among respondents. The next step was to analyze the relationship between demographic variables (e.g., gender, age, education, domicile) and answers to selected questions. Data analysis showed that for most questions, there were no significant differences resulting from the respondents' domicile or education. However, some discrepancies were observed for different genders.

Pivot tables were also used to analyze Likert-scale questions, which enabled the calculation of mean response values within individual respondent groups and the assessment of the frequency of specific response categories. In the further part of the analysis, basic measures of descriptive statistics were calculated. The analysis results are presented graphically using bar charts for % values and pie charts for the number of responses.

3. Results

3.1. Metric data

The group of respondents (N=969) was dominated by women, young people up to 25 years, residents of big cities, and people with higher education or secondary education during their studies (students). Detailed metric data are presented in Table 1.

The significant dominance of the indicated groups of respondents results from the specific nature of the research conducted in the FEE academic environment. The main target group of the survey was first- and second-stage students, of whom over 60% were female students. A detailed sociodemographic analysis of the age group 18–25 (N₀) showed that: women constituted 75% of the respondents, students or people with higher education constituted 75% of the respondents, residents of large cities constituted

54% of the respondents, and students constituted 54% of the respondents.

A similar structure of the respondent group was obtained in studies conducted in Poland and Spain, where women constituted 75.7% and 81.6% of the respondents, respectively, and the average age was 24 and 22 years [23]. Due to the specificity of the respondents, the research results obtained for questions in blocks I, II, and III were analyzed for the age group of 18–25 years as the largest coherent group of respondents (N₀=584). At the same time in block I, depending on the answer to question 11, the group of respondents aged 18–25 was (N₁=470) and (N₂=114), respectively.

Table 1. Sociodemographic structure of respondents (authors' own study)

Tabela 1. Struktura socjodemograficzna respondentów (opracowanie własne)

| Scope | Answer | Number of answers | % |
|-----------|------------------------------|-------------------|------|
| Gender | man | 219 | 22.6 |
| | woman | 728 | 75.1 |
| | prefer not to say | 22 | 2.3 |
| Age | 18–25 | 584 | 60.3 |
| | 26–35 | 191 | 19.7 |
| | 36–45 | 96 | 9.9 |
| | 46–65 | 84 | 8.7 |
| | >65 | 14 | 1.4 |
| Domicile | village | 208 | 21.5 |
| | small town (up to 10 000) | 49 | 5.0 |
| | medium city (10 000–100 000) | 201 | 20.7 |
| | big city (above 100 000) | 511 | 52.8 |
| Education | basic | 16 | 1.7 |
| | vocational | 15 | 1.6 |
| | secondary | 189 | 19.5 |
| | student | 346 | 35.7 |
| | higher | 403 | 41.5 |

3.2. Block I - purchasing textiles

Textile purchasing behavior among respondents appears to be shaped by both functional needs and psychological or social drivers. While necessity remains a key factor, motivations such as the desire for novelty or preparation for specific events (e.g., formal or social occasions) also play a significant role. Promotional strategies by retailers influence over one-fifth of consumers, highlighting the impact of marketing on purchasing decisions. Additionally, a subset of respondents engages in shopping for entertainment or as a response to shifting fashion trends. Gender differences reveal that women are more likely than men to cite expressive or occasion-related motivations, whereas men more often report buying textiles out of necessity. The results are presented in Figure 1.

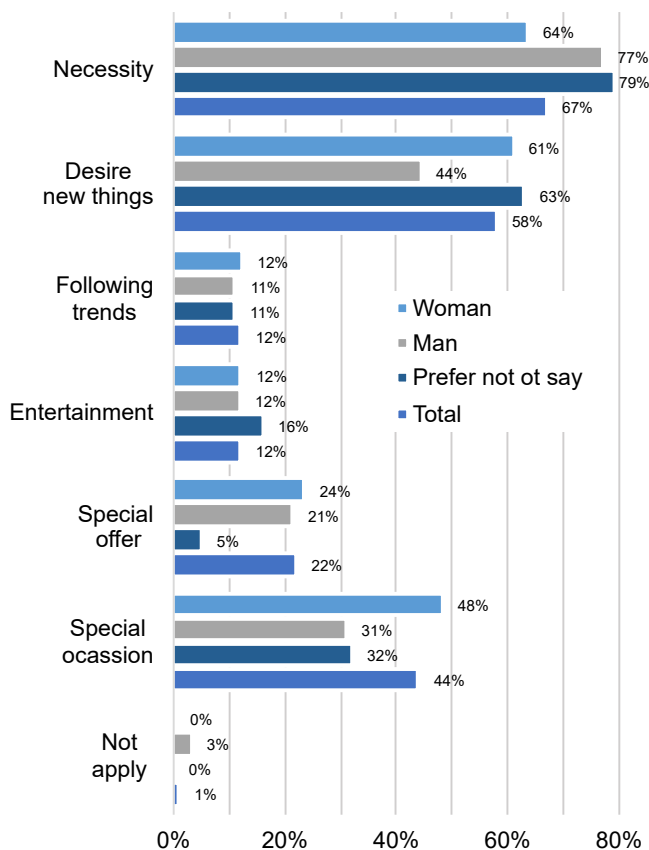


Fig. 1. Most common reasons for purchasing textiles – percentage distribution of responses by gender (authors’ own study)

Rys. 1. Najczęstsze powody zakupu tekstyliów – procentowy rozkład odpowiedzi według płci (opracowanie własne)

Nearly 50% of young respondents declared that they purchase textiles with seasonal frequency. At the same time, the results analysed by gender indicate that 52% of women and 33% of men declared more frequent shopping. According to the form of shopping, the most common answer was both stationary and online shopping (44%). In question 8, respondents declare chain stores (76%) and SH stores (57%) as the most common places to purchase textiles. Men significantly more often than women declared shopping in outlets and premium brand stores. In turn, significantly more women declared that they purchased SH textiles. When asked about habits regarding the examination of textile labels and the country of origin, 32% and 33% of respondents, respectively, reported that they always or often engage in these practices. Affirmative responses were more frequently provided by men. Conversely, 37.0% and 52.0% of respondents, respectively, indicated that they rarely verify this information or do not verify it at all.

The declaration of purchasing or not purchasing SH textiles divided the respondents into two groups, who were asked separate questions in the further part of Block I. In the entire respondent group N_0 , 81% of respondents declared an affirmative answer. The results showed significant differences in responses by gender – 60% of men

and 86% of women indicated an affirmative answer. The analysis of responses by place of residence showed that the SC is most often chosen by residents of large and small towns (84% and 86.2%, respectively). Education does not influence whether or not to buy SH textiles.

Respondents who participated in textile second circulation ($N_1=470$) declared that the most common places for purchasing textiles were SH shops (81%), shopping platforms (59%), and family or friends (39%). Women were more likely than men to use sales platforms and exchange and/or buy textiles from family and friends. More men declared purchasing SH textiles in vintage shops and at organised exchanges. Detailed results are presented in Fig.2.

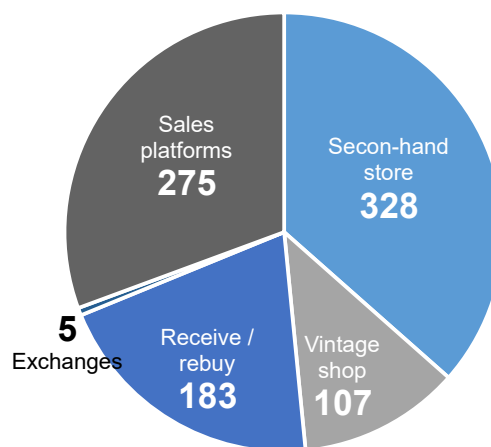


Fig. 2. The most common places to buy SH textiles (authors’ own study)

Rys. 2. Najczęstsze miejsca zakupu tekstyliów z drugiej ręki (opracowanie własne)

Price emerged as a dominant factor in shaping consumer decisions related to SH textile purchases. Other motivations diverged by gender, with women showing a stronger inclination toward environmental values, whereas men were relatively more motivated by product uniqueness. At the same time, a portion of respondents associated SH shopping with recreational and entertainment aspects. These findings highlight the multidimensional nature of consumer engagement with SH fashion. Detailed results are presented in Fig.3. In the context of the second-hand purchases frequency, 52% of respondents declared that they buy SH textiles several times a year, and 39% indicated a greater frequency. 55% of respondents purchase up to 10 pieces of SH textiles per year. At the same time, 16% of respondents purchase more than 25 pieces of SH textiles per year. A higher percentage of women than men declare that they purchase SH textiles more frequently and in greater quantities.

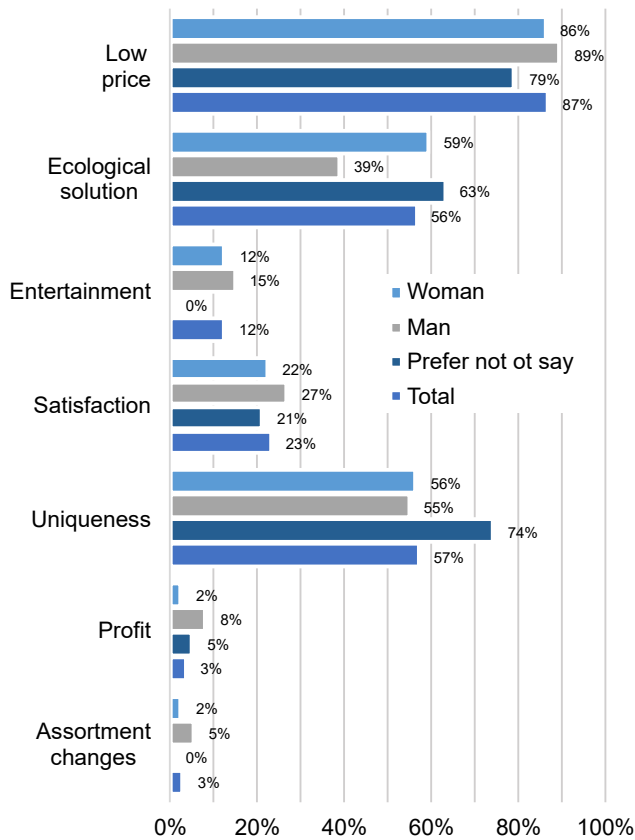


Fig. 3. The most important reasons for buying in SC – percentage distribution of responses by gender (authors' own study)

Rys. 3. Najważniejsze powody zakupów w drugim obiegu – procentowy rozkład odpowiedzi według płci (opracowanie własne)

As restrictions on the type of purchased SH textiles, respondents most frequently indicated underwear, personal use textiles, and shoes, which together accounted for almost 75% of all responses. Everyday wear and special occasion clothing received the fewest responses. 3% of respondents state that they purchase in SC all types of textiles. Detailed results are presented in Fig. 4.

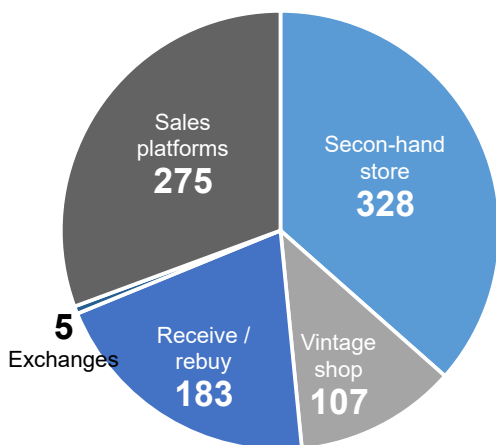


Fig. 4. Textiles which respondents do not purchase through SC (authors' own study)

Rys. 4. Tekstylia, których respondenci nie kupują w drugim obiegu (opracowanie własne)

Respondents who reported not purchasing second-hand textiles ($N_2=114$) were asked to indicate the primary reasons underlying this decision, as well as potential factors that could motivate a change in their purchasing behavior. Most respondents declared difficulties in finding a specific product (62%), hygiene reasons (44%), and the desire to have new things (40%). The hygienic aspect was more important for the women (48%), and the desire to have new things for the men (45%). On average, every fifth respondent also indicated the aspect of low quality, lack of appropriate size, and the need for product selection. The lack of a shop near the place of residence was indicated by 14% of all respondents, while among respondents living in villages or small towns, this answer was declared by 24% of respondents. Respondents identified several factors that could potentially influence their willingness to reconsider purchasing from second-hand channels (SC). Among these, perceptions of product quality, return policies, selection, and price emerged as key considerations. Gender-based differences were observed, with men placing relatively greater emphasis on better product selection, while women were more responsive to the availability of branded items. A notable minority of respondents either expressed resistance to any reconsideration or were unable to pinpoint a specific factor. Detailed results are shown in Fig. 5.

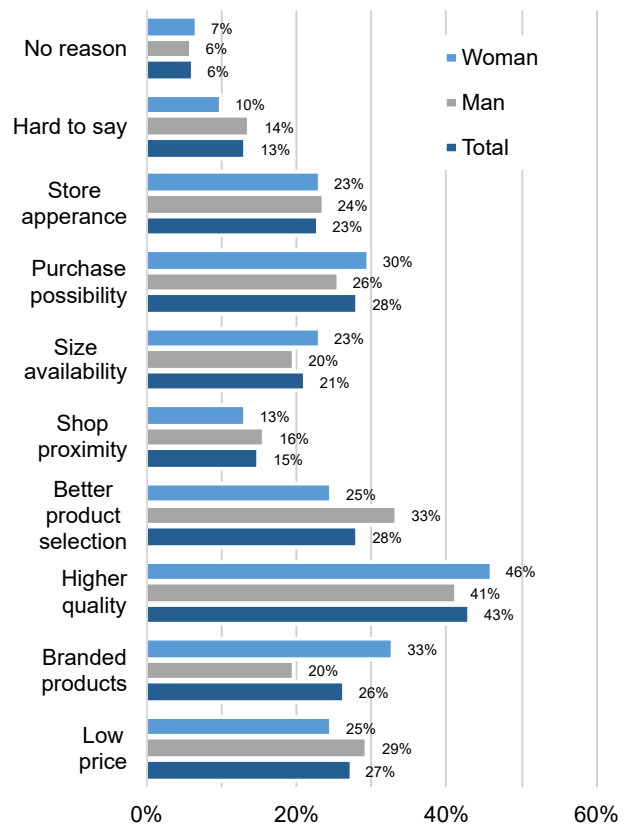


Fig. 5. Potential motivations of respondents to participate in the SC - percentage distribution of responses by gender* (authors' own study)
* Responses from the „Prefer not to say” gender group ($n=2$) are excluded from the chart due to insufficient sample size.

Rys. 5. Potencjalne motywacje respondentów do wspierania drugiego obiegu – procentowy rozkład odpowiedzi według płci* (opracowanie własne)
* Odpowiedzi z grupy „Wolę nie podawać” ($n=2$) nie zostały ujęte na wykresie ze względu na niewystarczającą liczebność próby.

3.3. Block II – the environmental impact of the textile industry

A majority of respondents (81%) perceived the textile industry as having a negative impact on the environment. Among young participants, the most frequently identified environmental concerns included high water consumption (73%), waste generation (60%), and the release of chemicals into ecosystems (59%). In contrast, the impacts considered least significant were the generation of wastewater and soil degradation. Similar results were obtained for rating the environmental impact of textile production and consumption at individual stages, with respondents identifying waste management, transport, and animal breeding as the most impactful.

Over 50% of the respondents identified the higher quality products, increased producer responsibility, and the promotion of SC as the most significant measures undertaken by companies in the textile sector to mitigate their environmental impact.

3.4. Block III – textile waste

The disposal of textiles was most frequently associated with practical factors such as wear and tear, lack of use, or size mismatch. Gender-based patterns emerged, with women more frequently reporting disposal due to reasons related to lifestyle or aesthetic shifts, such as lack of space or changes in personal style. A detailed breakdown of responses is provided in Fig. 6.

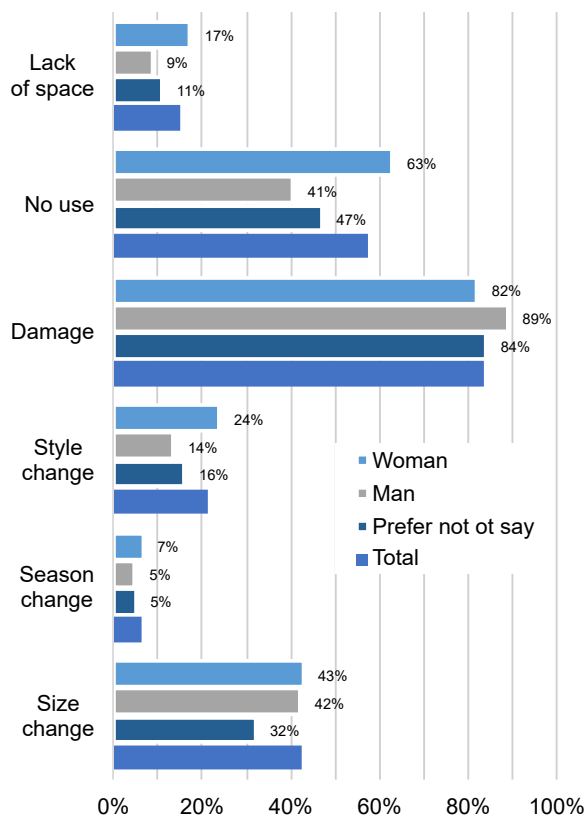


Fig. 6. Reasons for textiles throwing away - percentage distribution of responses by gender (authors' own study)

Rys. 6. Powody wyrzucania tekstyliów – procentowy rozkład odpowiedzi według płci (opracowanie własne)

Textile disposal practices among respondents reflect a preference for extending the lifecycle of garments by passing items on to family or friends and reselling. A considerable proportion also reported utilizing dedicated collection containers. Gender-based differences were observed: women more frequently engaged in reuse-oriented practices, while men were comparatively more likely to dispose of textiles via the mixed waste stream. Detailed results are shown in Fig.7. At the same time, 3% of respondents indicated that they sometimes get rid of new, unworn textile products, 51% of respondents do it occasionally, and 37% never.

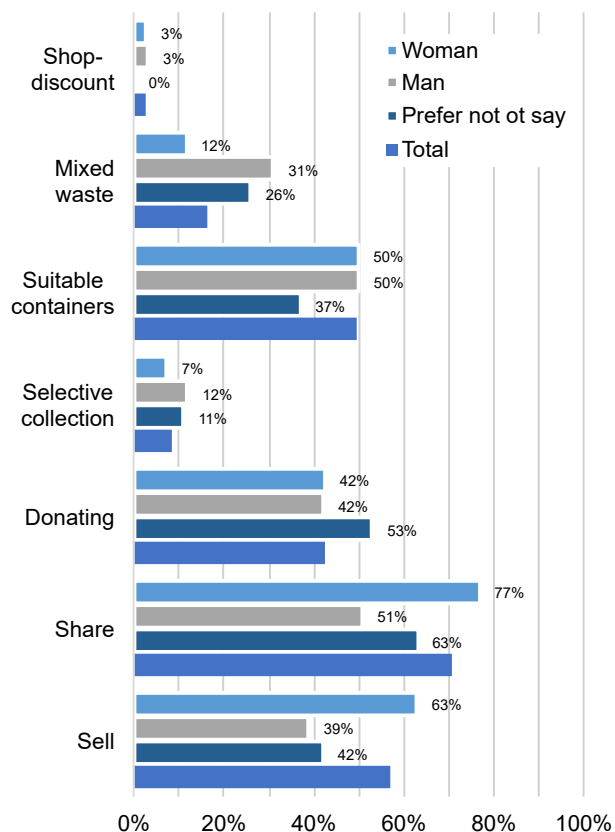


Fig. 7. Ways of textile disposal – percentage distribution of responses by gender (authors' own study)

Rys. 7. Sposoby pozbywania się tekstyliów – procentowy rozkład odpowiedzi według płci (opracowanie własne)

95% of respondents stated that the introduction of the selective textiles collection will significantly affect the development of their SC. At the same time, 71% of respondents declared their readiness to participate in such a system, and 52% of them stated that it would not cause any difficulties in their daily routines. Respectively, 22% and 32% of respondents were unable to provide a clear answer in this regard.

4. Discussion

The most common reason for purchasing textiles declared by young respondents is necessity, understood as a purchase motivated by a real need to supplement the wardrobe due to, for example, damage, change in size, or lack of a given type of clothing. This finding may be

interpreted as a positive indicator of rational and need-based consumption patterns within young consumers. The frequency of purchasing textiles is also positive, with nearly half of young consumers indicating a frequency no greater than seasonal. However, the presence of other motivational factors raises concerns. A substantial share of respondents reported buying clothes driven by non-functional motivations, such as the desire for novelty, exposure to promotional campaigns, or recreational shopping. Notably, 20% of respondents admitted to purchasing new clothing items multiple times per month. This level of consumption likely exceeds actual need and may reflect impulsive or habitual purchasing behaviors, potentially undermining sustainable fashion goals. Indicated findings point to a paradox in young consumers' behavior: while many appear to act consciously and responsibly in their textile consumption, a significant proportion still engages in overconsumption.

Respondents most frequently identified chain stores as their primary source of textile purchases. This finding is consistent with expectations, given the widespread availability of such retailers in shopping malls and online sales, which is as popular among respondents as stationary shopping. Popular chain stores belonging to the fast-fashion system introduce even more than 20 fashion collections a year, contributing to the acceleration of consumption cycles [24]. At the same time, over half of the respondents indicated SC channels as a preferred purchasing option, while approximately 24% reported buying textiles from clothing outlets. These results suggest a noteworthy trend among young consumers toward alternative forms of textile purchasing that may be more sustainable. The preference for SH products or outlet items, typically associated with better quality or surplus stock from fast-fashion retailers, may reflect growing environmental awareness and a desire to engage in more responsible consumption practices.

The slow fashion model is based on reduced consumption of clothing, emphasizing the purchase of fewer but higher-quality items that offer durability and long-term value [25]. In this context, consumer behaviors such as verifying the quality, fiber composition, and country of origin of textiles are key indicators of socially and environmentally responsible purchasing. According to the findings, approximately one-third of young consumers report engaging in such verification, suggesting the emergence of more conscious consumption habits. Textile sourcing and composition information play a critical role in sustainable fashion choices. Locally produced textiles contribute to lowering the carbon footprint by reducing the need for international transportation [26]. Likewise, awareness of fiber composition allows consumers to make more informed decisions, preferring recyclable or biodegradable materials and avoiding blends of natural and synthetic fibers that are difficult to recycle. Furthermore, attention to care labels can extend the lifespan of garments, which supports changes towards slow fashion. Despite these positive signs, the data reveal significant gaps in sustainable behavior. Over one-third of respondents do not check la-

bel information at all, and half never verify the country of origin. This suggests that a considerable segment of young consumers lacks awareness or engagement with key aspects of responsible textile consumption. These findings underscore the need for targeted educational initiatives and clearer labeling practices that can support informed decision-making and foster more sustainable habits.

The SC of textiles plays a pivotal role in the transformation of fashion towards CE principles. By enabling the reuse of textile products, SC serves as a viable alternative to the dominant fast-fashion model, contributing to the reduction of textile waste streams and the extension of product life cycles. Among the surveyed group of young consumers, nearly 2/3 indicated SC as one of their most frequent sources of clothing, and as many as 80% declared that they purchase textiles in this channel. These figures suggest a growing openness among young consumers to engage in more sustainable consumption practices. The primary motivations for engaging with SC include financial considerations, environmental concerns, and the appeal of product uniqueness. This observation aligns with findings from similar research conducted among 18-24 year-old consumers in France [22]. Concurrently, the literature suggests that ecological, ethical, and social motivations alone are seldom sufficient to engage in SC consumption unless accompanied by financial incentives [27-28]. Only 3% of respondents declare purchasing all types of textile products in SC. The main restrictions are hygienic and apply to underwear, personal textiles, and shoes. These findings are consistent with previous studies indicating that fears related to germs, disease transmission, and product cleanliness strongly influence consumer hesitancy, especially for products that come into direct contact with the skin [29-31]. In addition to hygiene-related concerns, respondents identified structural and operational differences between SC and fast-fashion retail models as notable barriers. The inherently variable and non-replicable nature of SC inventory, driven by the post-consumer and post-production waste streams, limits the ability of second-hand retailers to consistently meet market demand in terms of style, sizing, and seasonality. The lack of standardized presentation and assortment often requires consumers to invest considerable time and effort in browsing. In contrast, the undoubted advantage of the fast-fashion model is the full range of product sizes, the seasonality of the collection, and the specific style and character of the clothes sold by each brand. The significance of these factors is further underscored by respondents' answers to the question concerning potential actions that could incentivize their participation in SC. In their responses, approximately 1/4 of respondents indicated greater size availability, enhanced product selection, access to branded items, and a more attractive store's appearance. An equally important aspect for consumers would be a better returns policy, which is very common in the fast-fashion model. As the literature indicates, return policies are more likely to promote purchases than to encourage returns [32]. Notably, the most frequently desired change in SC was the improvement in offered product quality. The quality of textiles available in

the SC is closely tied to both - the original manufacturing quality and the effectiveness of sorting processes. The declining quality of textiles associated with the fast-fashion model adversely affects the quality of SH textiles. Consumers particularly emphasize issues such as faded colors, malfunctioning zippers, low tear resistance, and split seams as indicators of inferior quality [24]. These deficiencies undermine consumer trust and satisfaction with SC purchases. In contrast, some respondents motivated their SC purchases by the high quality of products. Respondents particularly emphasized the availability of textiles made from natural fibers, such as silk or linen, offered at affordable prices. This indicates that with proper curation and communication, the SC sector has the potential to appeal to quality-conscious consumers, provided that barriers related to hygiene, consistency, and user experience are systematically addressed.

More than 50% of the young SC consumers indicated that they purchase up to 10 products annually, which aligns with the dominant self-reported purchasing frequency of „several times annually”. This relatively moderate level of consumption suggests that, for many individuals, SC serves as a supplementary source of clothing acquisition rather than a primary mode of fast-paced consumption. Notably, a substantial group of young respondents reported purchasing more than 25 items annually through SC, and 13% indicated that they view this form of shopping as a source of relaxation and entertainment. Such behavior may be influenced by both economic and psychological factors. The affordability of second-hand textiles lowers the barrier to frequent purchasing, while the non-repeatable and unpredictable nature of SC inventory can create a sense of urgency or scarcity. This may encourage impulsive buying driven by the fear of missing out on unique or desirable items. Importantly, these patterns may also reflect a phenomenon referred to as behavioral greenwashing [33]. The aforementioned concept refers to a form of cognitive dissonance where consumers rationalize excessive or compulsive consumption of SH clothing with environmental ethics, including a commitment to sustainable fashion. This paradox underscores a critical tension in contemporary sustainable fashion discourse: while SC offers a more circular alternative to fast fashion, it does not inherently guarantee sustainable behavior. Without deeper shifts in consumer awareness and self-regulation, second-hand shopping can reproduce the same patterns of overconsumption that characterize the fast fashion model.

The study revealed that 1/5 of young respondents does not engage in the SH clothing market. Among this group, over 40% cited a preference for owning new items as the primary reason for their avoidance of SC. Additionally, 13% were unable to identify any factor that might encourage them to reconsider their stance. These findings suggest a general negative approach to the SC, which may stem from psychological or social factors, e.g., issues of social status, prejudices, or fear of criticism [34-35].

The results revealed pronounced gender-based differences in textile purchasing behavior. Women declared a higher frequency of textile purchases, often motivated by

the desire to acquire new items, and were less likely than men to verify information provided on product labels. Simultaneously, women demonstrated greater engagement with SH clothing, with 20% more women than men citing environmental concerns as a motivation for their SC purchases. Furthermore, 40% of women, compared to 27% of men, stated that they buy SH textiles at least once a month or more frequently. Annual purchasing patterns also reflect this disparity, with women significantly more likely than men to report buying more than 10 SH items per year. The above responses indicate that women play a key role in driving the fashion industry, which is reflected in their higher textile consumption compared to men. Other scientific publications confirm that women are characterized by higher textile consumption and, at the same time, greater involvement in sustainable fashion and the SC of textiles [36]. On the other hand, the combination of high SH purchasing frequency and the other above-mentioned factors may indicate the phenomenon of behavioral greenwashing, where consumer ethics allow for further intensive consumption if it meets the assumed ethical standards. In this context, frequent consumption may be „morally justified” by the perception that purchasing SH items aligns with sustainable values. Such behavior highlights a potential contradiction, where ethical considerations facilitate rather than slow consumerism.

Every 4th young respondent identified the textile industry as having a negative environmental impact, primarily due to high water consumption, chemical pollution, and textile waste. These concerns are well-documented in the literature [37-40]. Respondents pointed to higher product quality and producer responsibility as key actions for the fashion industry to support sustainable fashion. These suggestions align with the EU Council’s 2024 strategy on sustainable textiles, which promotes extended producer responsibility and the development of textile recycling technologies [41]. The young consumer responses indicate their high environmental awareness. Literature underlines that the growing social awareness related to environmental problems has forced the textile industry to develop towards sustainable production [42]. However, the purchasing behaviors observed in the study - such as frequent shopping driven by desire or entertainment - indicate a disconnect between ecological awareness and actual sustainable consumer practices. This supports the concept of the ‘attitude-behavior gap’, where sustainable intentions are not consistently translated into action [43].

A positive observation emerging from the study is that textile disposal was most frequently motivated by physical damage, indicating that many consumers extend the use phase of garments before discarding them. In contrast, nearly 60% of respondents - particularly women - reported discarding textiles due to lack of use, highlighting issues of overconsumption and impulsive or poorly considered purchasing decisions. Combined with disposal due to size or style changes, these findings suggest that a substantial portion of post-consumer textile waste may consist of garments still suitable for reuse within the SH market. Effective circular fashion requires, above all, improvements in

the textile collection system. During the study period, respondents most commonly disposed of textiles by giving them to family or friends, reselling them, or using dedicated textile containers. These behaviors reflect a proactive attitude toward supporting second-hand circulation and align with circular economy principles. Textile container donations - popularized in Poland during the 1990s humanitarian efforts - remain a common practice as in other European countries [44-45]. The mentioned system is implemented by non-governmental charitable organizations or the private entities. The largest charitable organizations typically cooperate with the textile sector, enabling the reuse of good-quality textiles. However, some of these collections carry the risk of abuse by dishonest companies, especially with low-value or poor-quality textiles. The solution to these problems is undoubtedly the implementation of an effective system for textile waste collection and processing supervised by municipal waste management systems. At the time of the research period (2023), no nationwide selective collection system for textiles had been implemented in Poland, although its introduction was planned for 2025 in line with broader EU policies. Nevertheless, some municipalities have begun collecting textiles through stationary selective waste collection points (SWCP), and around 10% of respondents reported using these facilities to dispose of textiles. Importantly, 70% of surveyed young consumers declared a willingness to participate in selective textile collection, indicating strong potential for public engagement. At the same time, a significant portion of respondents were not ready to declare participation in selective textile collection, likely due to limited information about the system's functioning at the time.

As of 2025, it is established in national legislation that municipalities are required to collect textiles at least through SWCP. However, from the residents' perspective, this solution is not always convenient due to significant regional disparities in access. According to 2022 data, Poland operated 2,172 SWCP, equating to an average of one point per approximately 17,000 inhabitants [46]. In densely populated urban areas, such as Warsaw - with over 1.8 million residents and only four collection points - this ratio is considerably less favorable. Conversely, in rural or sparsely populated regions, the primary barrier is the distance and the logistical burden placed on residents to transport textile waste themselves. These accessibility limitations may contribute to consumer disengagement from proper textile disposal practices. In response, some municipalities have introduced supplementary solutions, including municipal textile containers and periodic mobile collection events [47]. While these measures may enhance local participation, reducing regional infrastructure disparities will be crucial to ensuring equitable and effective textile waste management nationwide.

Currently, at the beginning of 2026, the first quantitative data on textile waste collected in 2025 are emerging. For example, the Wrocław municipality collected 610 tons of textiles - nearly 80% at SWCP and 20% through mobile collections [48]. This represents a significant increase compared to 2023 and 2024, where 67 and 81 tons of

textiles were collected, respectively. Detailed data for each Polish municipality will appear in annual reports, which are typically published in the second quarter of the year. These reports will also present the implemented textile collection models and enable an assessment of their effectiveness through nationwide comparison.

At the same time, it is already evident that the introduction of a selective textile collection system has disrupted the functioning of non-system collection schemes. The most well-known charitable organization in Poland cooperating with a company from the textile sector has suspended its container-based textile collection due to the declining quality of donated items. Representatives of the organization point to a significant increase in the share of damaged textiles within the collected stream, which should instead be delivered to SWCP. The easy accessibility of charitable containers, combined with the limited availability of SWCP facilities and the prospect of penalties for improper waste sorting, encourages consumers to dispose of all textiles through charitable collection. As a result, the cooperation has become unprofitable due to the high costs of managing and disposing of unusable clothing [49]. This situation already highlights deficiencies in municipal textile collection systems, indicating the need to improve their accessibility for residents. At present, it remains unclear how these changes will affect the actual management of the textile waste stream.

5. Conclusions

The findings of this study underscore young consumers' engagement with sustainable fashion, revealing both promising trends and existing challenges. One of the most positive aspects observed is the environmental impact awareness of the fashion industry, which translates into conscious purchasing decisions. Many respondents demonstrate a preference for second-hand shopping and express concern over the environmental impact of the textile industry. These attitudes indicate a shift toward more sustainable practices and a willingness to engage in circular economy models, such as clothing reuse and selective textile collection. At the same time, it should be acknowledged that the respondent group was not fully demographically balanced, with a predominance of female participants. Given that women exert a stronger influence on the fashion industry than men, this imbalance may have shaped some of the observed patterns. Nevertheless, the high level of sustainability awareness remains a significant and meaningful finding. However, this awareness does not always translate into consistent, sustainable behavior.

A central contradiction emerges in consumer practices: while purchases are often declared to be need-driven and based on conscious reflection, non-functional motivations, such as the pursuit of novelty or entertainment, remain prevalent. This ambivalence is particularly evident in the popularity of second-hand shopping, which, despite its sustainable potential, sometimes replicates the consumption intensity of fast fashion. Such behavior reflects

the phenomenon of behavioral greenwashing, wherein consumers use ethical justifications to rationalize excessive consumption under the guise of sustainability. It must also be noted that the study did not allow for a strong comparison between the young respondent group and the broader population, as the general population sample was significantly smaller. Although this limits the possibility of generalization, it does not diminish the internal consistency of the patterns identified within the analyzed group.

Gender-based differences were also observed. Women, while generally more engaged with sustainable fashion channels and more likely to cite environmental motivations, also exhibit higher purchasing frequencies and are less attentive to product-related information such as origin or composition. This paradox reinforces the broader pattern of misalignment between sustainable attitudes and actual behavior, highlighting the persistence of the attitude-behavior gap in the fashion domain. The demographic disproportions in the sample suggest an important direction for future research, particularly in exploring how age and gender shape sustainable fashion engagement and consumption intensity.

Despite these challenges and methodological constraints, the findings offer a promising outlook for the role of young consumers in transforming the fashion system. Their expressed willingness to participate in sustainable initiatives, coupled with a growing demand for transparency and quality, can serve as a catalyst for systemic change. The high rate of declared participation in selective textile collection also suggests an increasing commitment to waste reduction and resource conservation. This engagement reflects an evolving mindset where individual consumer actions contribute to broader systemic change, emphasizing the importance of collective responsibility in fostering a sustainable fashion industry. Bridging the gap between intention and action will require targeted education, improved infrastructure, and stronger institutional support to ensure that sustainable choices are both accessible and meaningful.

Overall, despite the indicated limitations, the study provides a coherent and valuable contribution to the understanding of young consumers' sustainability-related behaviors. By capturing both the strengths and contradictions of this group, it offers a nuanced and empirically grounded perspective that constitutes a strong foundation for further research and practical interventions aimed at supporting the transition toward a more sustainable fashion system.

Acknowledgements: The authors wish to express their sincere gratitude to all students who contributed to various stages of the research as members of the Environmental Team scientific group. In particular, we acknowledge the valuable involvement of Maryla Znamierowska, Emilia Rus, Weronika Bugajska, Michał Kuciej, Karolina Decowska, and Olga Lemańska. Special thanks are extended to Marcin Wdowikowski for his support with the statistical analysis.

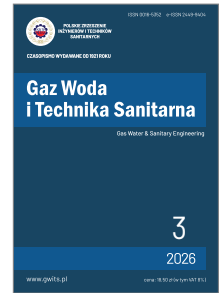
Data availability: The survey form and other data, including results, are available from the corresponding author on request.

luding results, are available from the corresponding author on request.

6. References

- [1] Baena, V. (2024). The shift from fast fashion to socially and sustainable fast fashion: The pivotal role of ethical consideration of consumer intentions to purchase Zara. *Corporate Social Responsibility and Environmental Management*, 31(5), 4315-4328. <https://doi.org/10.1002/csr.2803>
- [2] Olivar Aponte, N., Hernández Gómez, J., Torres Argüelles, V., & Smith, E. D. (2024). Fast fashion consumption and its environmental impact: A literature review. *Sustainability Science, Practice and Policy*, 20(1). <https://doi.org/10.1080/15487733.2024.2381871>
- [3] Long, X., & Nasiry, J. (2022). Sustainability in the fast fashion industry. *Manufacturing & Service Operations Management*, 24(3). <https://doi.org/10.1287/msom.2021.1054>
- [4] WRAP. (2017). *Valuing our clothes: The cost of UK fashion*. https://www.wrap.ngo/sites/default/files/2020-10/WRAP-valuing-our-clothes-the-cost-of-uk-fashion_WRAP.pdf
- [5] European Environment Agency (EEA). (2019). *Textiles and the environment in a circular economy*. Eionet Report - ETC/WMGE 2019/6. <https://www.eionet.europa.eu/etcs/etc-wmge/products/etc-wmge-reports/textiles-and-the-environment-in-a-circular-economy>
- [6] Vijayarasa, R., & Liu, M. (2022). Fast fashion for 2030: Using the pattern of the Sustainable Development Goals (SDGs) to cut a more gender-just fashion sector. *Business and Human Rights Journal*, 7(1), 45-66. <https://doi.org/10.1017/bhj.2021.29>
- [7] Boston Consulting Group. (2019). *Pulse of the fashion industry*. <https://globalfashionagenda.org/pulse-of-the-industry>
- [8] European Environment Agency (EEA). (2022). *Textiles and the environment: The role of design in Europe's circular economy*. <https://www.eea.europa.eu/publications/textiles-and-the-environment-the>
- [9] Tran, H. N. Q., & Dung, N. D. (2024). Fast fashion issue in Vietnam: Legal aspects and environmental protection. *Pakistan Journal of Criminology*, 4, 1119-1136. <https://doi.org/10.62271/pjc.16.2.1119.1136>
- [10] Nimkar, U. (2018). Sustainable chemistry: A solution to the textile industry in a developing world. *Current Opinion in Green and Sustainable Chemistry*, 9, 13-17. <https://doi.org/10.1016/j.cogsc.2017.11.002>
- [11] Khan, W. U., Ahmed, S., Dhoble, Y., & Madhav, S. (2023). A critical review of hazardous waste generation from textile industries and associated ecological impacts. *Journal of the Indian Chemical Society*, 100, 100829. <https://doi.org/10.1016/j.jics.2022.100829>
- [12] Weis, J. S., & De Falco, F. (2022). Microfibers: Environmental problems and textile solutions. *Microplastics*, 1(4), 626-639. <https://doi.org/10.3390/microplastics1040043>
- [13] Rashid, S., & Malik, S. H. (2023). Transition from a linear to a circular economy. In *Renewable Energy in Circular Economy* (pp. 1-18). Springer Nature. https://doi.org/10.1007/978-3-031-42220-1_1
- [14] Gorokhova, T., Shpatakova, O., Toponar, O., Zolotarova, O., & Pavliuk, S. (2023). Circular economy as an alternative to the traditional linear economy: Case study of the EU. *Revista de Gestão Social e Ambiental*, 17(5), e03385. <https://doi.org/10.24857/rgsa.v17n5-002>
- [15] Castro-López, A., Iglesias, V., & Puente, J. (2021). Slow fashion trends: Are consumers willing to change their shopping behavior to become more sustainable? *Sustainability*, 13(24), 13858. <https://doi.org/10.3390/su132413858>
- [16] Zhang, B., Zhang, Y., & Zhou, P. (2021). Consumer attitude towards sustainability of fast fashion products in the UK. *Sustainability*, 13(4), 1646. <https://doi.org/10.3390/su13041646>

- [17] Domingos, M., Vale, V. T., & Faria, S. (2022). Slow fashion consumer behavior: A literature review. *Sustainability*, 14(5), 2860. <https://doi.org/10.3390/su14052860>
- [18] Koszewska, M. (2017). Consumer in the face of the challenges of circular economy in textile and clothing market [in Polish]. *Research Papers of Wrocław University of Economics*, 501. <https://doi.org/10.15611/pn.2017.501.12>
- [19] Mandarić, D., Hunjet, A., & Kozina, G. (2021). Perception of consumers' awareness about sustainability of fashion brands. *Journal of Risk and Financial Management*, 14, 594. <https://doi.org/10.3390/jrfm14120594>
- [20] Rostiani, R., & Kuron, J. (2019). Purchase of fast-fashion by younger consumers in Indonesia: Do we like it or do we have to like it? *Jurnal Ekonomi dan Bisnis Indonesia*, 34(3), 249-266. <https://core.ac.uk/reader/297709030>
- [21] Proszowska, A., Mamcarczyk, M., & Lisowski, R. (2024). Factors shaping environmental awareness of young adults and its importance in market decision-making processes. *International Entrepreneurship Review*, 10(3), 79-94. <https://doi.org/10.15678/IER.2024.1003.06>
- [22] Premiere Vision. (2024). *Fashion: The new priorities of young consumers*. <https://www.premierevision.com/en/articles/df3754d9-75fa-ef11-90cb-00224888722c>
- [23] Borusiak, B., Szymkowiak, A., Lopez-Lluch, D. B., & Sanchez-Bravo, P. (2021). The role of environmental concern in explaining attitude towards second-hand shopping. *Entrepreneurship and Business Economics Review*, 9(2), 71-83. <https://doi.org/10.15678/EBER.2021.090205>
- [24] Centobelli, P., Abbate, S., Nadeem, S. P., & Garza-Reyes, J. A. (2022). Slowing the fast fashion industry: An all-round perspective. *Current Opinion in Green and Sustainable Chemistry*, 38, 100684. <https://doi.org/10.1016/j.cogsc.2022.100684>
- [25] Jung, S., & Jin, B. (2016). Sustainable development of slow fashion businesses: Customer value approach. *Sustainability*, 8(6), 540. <https://doi.org/10.3390/su8060540>
- [26] Handayani, R. B., & Thanaprasittikul, S. (2022). Finding value: Exploring local resources for sustainable fashion. In *Sustainability in Creative Industries. Advances in Science, Technology & Innovation* (pp. 75-89). Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-52726-5_7
- [27] Harris, F., Roby, H., & Dibb, S. (2016). Sustainable clothing: Challenges, barriers and interventions for encouraging more sustainable consumer behaviour. *International Journal of Consumer Studies*, 40, 309-318. <https://doi.org/10.1111/ijcs.12257>
- [28] Jägel, T., Keeling, K., Reppel, A., & Gruber, T. (2012). Individual values and motivational complexities in ethical clothing consumption: A means-end approach. *Journal of Marketing Management*, 28(3-4). <https://doi.org/10.1080/0267257X.2012.659280>
- [29] Liang, J., & Xu, Y. (2018). Second-hand clothing consumption: A generational cohort analysis of the Chinese market. *International Journal of Consumer Studies*, 42(1), 120-130. <https://doi.org/10.1111/ijcs.12393>
- [30] Shah, P., & Gajjar, C. (2021). Secondhand shopping: Understanding consumer behavior toward pre-owned clothing in India. *WRI Publications*. <https://doi.org/10.46830/wri-pn.20.00035>
- [31] Amaral, J. H. G., & Spers, E. E. (2022). Brazilian consumer perceptions towards second-hand clothes regarding Covid-19. *Clean Responsible Consumption*, 5, 100058. <https://doi.org/10.1016/j.clrc.2022.100058>
- [32] Janakiraman, N., Syrdal, H. A., & Freling, R. (2016). The effect of return policy leniency on consumer purchase and return decisions: A meta-analytic review. *Journal of Retailing*, 92(2), 226-235. <https://doi.org/10.1016/j.jretai.2015.11.002>
- [33] Byłok, F. (2017). Morality and ethical consumption: A discussion on ethical dimensions in consumption [in Polish]. *Power of Judgment*, 13, 194-206. <http://hdl.handle.net/11089/25817>
- [34] Herjanto, H., Scheller-Sampson, J., & Erickson, E. (2016). The increasing phenomenon of second-hand clothes purchase: Insight from the literature. *Jurnal Manajemen dan Kewirausahaan*, 18(1), 1-15. <https://doi.org/10.9744/jmk.18.1.1-15>
- [35] Neugebauer, D. D. (2022). *Second-hand fashion: Rags or riches?* (Master thesis). IPAM Porto. <https://comum.rcaap.pt/server/api/core/bitstreams/4b19b345-542f-4822-bd72-ca6ba7cac0a9/content>
- [36] Kleinhüeckelkotten, S., & Neitzke, H. P. (2019). Social acceptability of more sustainable alternatives in clothing consumption. *Sustainability*, 11(22), 6194. <https://doi.org/10.3390/su11226194>
- [37] Jadhav, S. B., Chougule, A. S., Shah, D. P., Pereira, C. S., & Jadhav, J. P. (2015). Application of response surface methodology for the optimization of textile effluent biodecolorization and its toxicity perspectives using plant toxicity, plasmid nicking assays. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 17, 709-720. <https://doi.org/10.1007/s10098-014-0827-3>
- [38] Niinimäki, K., Peters, G., Dahlbo, H., Perry, P., Rissanen, T., & Gwilt, A. (2020). The environmental price of fast fashion. *Nature Reviews Earth & Environment*, 1, 189-200. <https://doi.org/10.1038/s43017-020-0039-9>
- [39] Acharya, S., Rumi, S. S., Hu, Y., & Abidi, N. (2021). Microfibers from synthetic textiles as a major source of microplastics in the environment: A review. *Textile Research Journal*, 91(17-18), 2136-2156. <https://doi.org/10.1177/0040517521991244>
- [40] Köhler, A., Watson, D., Trzepacz, S., Löw, C., Liu, R., Danneck, J., Konstantas, A., Donatello, S., & Faraca, G. (2021). *Circular economy perspectives in the EU textile sector - Final report*, Publications Office. <https://doi.org/10.2760/858144>
- [41] Council of the European Union. (2024). *Proposal for a directive of the European Parliament and of the Council amending Directive 2008/98/EC on waste - General approach*. https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CONSIL:ST_11300_2024_ADD_1_REV_1
- [42] Karthik, T., & Gopalakrishnan, D. (2014). Environmental analysis of textile value chain: An overview. In *Roadmap to sustainable textiles and clothing* (pp. 101-120). Springer, Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-287-110-7_6
- [43] Soyer, M., & Dittrich, K. (2021). Sustainable consumer behavior in purchasing, using and disposing of clothes. *Sustainability*, 13(15), 8333. <https://doi.org/10.3390/su13158333>
- [44] Soares, B., Ramos, M., & Martinho, G. (2024). Factors to consider for the implementation of a municipal scheme for the separate collection of textile waste. *Sustainable Futures*, 7, 100203. <https://doi.org/10.1016/j.sfr.2024.100203>
- [45] Li, Yibing. (2024). *A Comparative Analysis of Textile Waste Collection Methods in Norway, Finland, and Sweden* (Bachelor Thesis). <https://www.theseus.fi/handle/10024/906715>
- [46] Institute of Environmental Protection - National Research Institute. (2024). Reports of Voivodeship Marshals on the implementation of municipal waste management tasks in 2022. <https://ios.edu.pl/aktualnosci/sprawozdania-marszalkow-wojewodztw-z-realizacji-zadan-z-zakresu-gospodarowania-odpadami-komunalnymi-w-2022-r>
- [47] Green Wrocław. (2024). *Samochód zbierający odzież i tekstylia wyjedzie na ulice Wrocławia*. <https://www.wroclaw.pl/zielony-wroclaw/samochod-zbierajacy-odziez-i-tekstylia-wyjedzie-na-ulice-wroclawia>
- [48] Green Wrocław. (2026). *Wrocławski system zbiórki tekstyliów – najefektywniejszy w Polsce*. <https://www.wroclaw.pl/zielony-wroclaw/wroclawski-system-zbiorki-tekstyliow-najefektywniejszy-w-polsce>
- [49] Money.pl. (2026). *Kontenery PCK znikają – oto skutek nowych przepisów*. <https://www.money.pl/gospodarka/kontenery-pck-znikaja-oto-skutek-nowych-przepisow-7190859173349984.html>



Reaktor wędrującej fali TWR

Traveling wave reactor TWR

Wojciech Kramarek¹* 

¹ Państwowa Akademia Nauk Stosowanych Im. Ignacego Mościckiego w Ciechanowie

*Kontakt / Correspondence: wojciech.kramarek@gmail.com

Streszczenie:

Koncepcja reaktora wędrującej fali (traveling wave reactor, TWR) daje nadzieję na przełom w dążeniu do bezpiecznej, niskoemisyjnej energetyki sprzyjającej zrównoważonemu rozwojowi, wspierającej przeciwdziałanie zmianom klimatycznym oraz redukcję ubóstwa energetycznego. Technologia TWR rozwiązuje kluczowe problemy obecnej energetyki jądrowej: pozwala na „wypalanie” niebezpiecznych odpadów radioaktywnych i drastycznie ogranicza ryzyko proliferacji broni. TWR może pracować bez wymiany wkładu przez 40–60 lat. Pasywne systemy bezpieczeństwa minimalizują ryzyko awarii, a magazynowanie ciepła w stopionej soli umożliwia bezproblemową integrację elektrowni z OZE.

Słowa kluczowe: TWR, reaktor wędrującej fali, wypalanie odpadów radioaktywnych

Abstract:

The traveling wave reactor (TWR) concept offers hope for a breakthrough in the pursuit of safe, low-emission energy that fosters sustainable development, supports climate change mitigation, and reduces energy poverty. TWR technology solves key challenges facing current nuclear power: it allows for the „burnout” of hazardous radioactive waste and drastically reduces the risk of weapons proliferation. TWRs can operate without replacement for 40–60 years. Passive safety systems minimize the risk of failure, and molten salt heat storage enables seamless integration of the power plant with renewable energy sources.

Keywords: TWR, traveling wave reactor, radioactive waste burnout

1. Wprowadzenie

Pod koniec XX wieku Bill Gates wraz z grupą podobnie myślących ludzi troszczących się o rozwój ludzkości, opracowali program ukierunkowany na rozwój energetyki. Ustalono, że należy podjąć działania, aby przeciwdziałać narastającym zmianom klimatycznym wynikającym ze spalania paliw kopalnych. Stwierdzono, że rosnące gwałtownie zapotrzebowanie na energię elektryczną powinno być zrealizowane przez rozwój zaawansowanej energetyki jądrowej. Założono, że rozwój energetyki jądrowej doprowadzi do spadku cen energii elektrycznej przyczyniając się do wydobycia miliardów ludzi z ubóstwa.

Opracowane cele zakładały: zwiększenie bezpieczeństwa pracy reaktorów, zmniejszenie ilości odpadów radioaktywnych oraz dostosowanie produkcji energii elektrycznej do aktualnych potrzeb sieci. Ponadto zapewnienie niezależności energetycznej, zrównoważony rozwój środowiskowy oraz postęp medyczny w medycynie nuklearnej.

Opracowane rozwiązanie mają wprowadzać ulepszenia w jak największej liczbie obszarów działalności jądrowej: dotyczących bezpieczeństwa, odpadów, wydajności, ekonomii, odporności na rozprzestrzenianie broni, redukcji ryzyka terrorystycznego oraz ogólnej akceptacji społecznej.

Produktem odpadowym, bardzo niebezpiecznym, przy pracy konwencjonalnych zawodowych reaktorów jest pluton i jego izotopy. Służy on nie tylko do produkcji broni nuklearnej, ale jest również radioaktywnym odpadem trwającym dziesiątki tysięcy lat. Pojawienie się kilkanaście lat temu reaktorów powielających stworzyło szansę na „wypalanie” odpadów radioaktywnych. Ten proces mógłby pomóc w zmniejszeniu ilości odpadów z elektrowni jądrowych i zmniejszenia zagrożeń proliferacją. Większość plutonu z reaktorów jest częścią odpadów radioaktywnych, głównie w formie proszku dwutlenku plutonu. Ta forma przechowywania czyni ten składnik podatnym na kradzież i potencjalne wykorzystanie przy produkcji nielegalnej, terrorystycznej broni.

2. Traveling wave reactor TWR

Możliwość wykorzystania odpadów radioaktywnych do produkcji energii elektrycznej oraz zmniejszenie ich ilości na składowiskach były istotnymi powodami rozpoczęcia poszukiwań nowych typów reaktorów. Dzięki rozwojowi wiedzy dotyczącej energetyki jądrowej, nowym możliwościom obliczeniowym oraz nowym materiałom będą powstawały rozwiązania, które były niewyobrażalne jeszcze kilkadziesiąt lat temu.

Wybrany modelem docelowym został tzw. reaktor z wędrującą bieżącą (ang. traveling wave reactor, TWR), którego koncepcja (niezrealizowana) znana jest od wielu lat. Podstawową cechą proponowanego reaktora, zbliżonego w działaniu do reaktora powielającego, jest jego zdolność do przekształcania materiału rozrodzonego w użyteczne paliwo jądrowe na bieżąco i na miejscu w obrębie reaktora. W reaktorze natychmiast zaczyna się proces rozszczepienia wytworzonego materiału jądrowego (plutonu), wytwarzając energię i produkty rozpadu, bez konieczności wyjmowania paliwa z reaktora i jego przetwarzania.

TWR różni się od innych typów reaktorów tym, że pracuje z wysoką efektywnością energetyczną, bez konieczności wzbogacania używanego paliwa, ani przeprowadzania jakiegokolwiek przetwarzania. Paliwem będzie uran naturalny, uran zubożony, tor lub wypalone paliwo z reaktorów lekkowodnych.

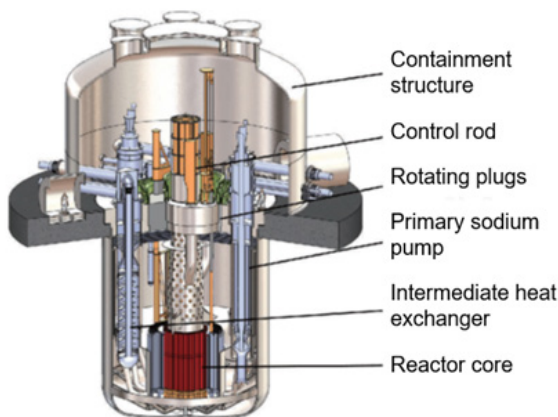
Powstającą koncepcję TWR oparto na kilku założeniach:

1. Musi być reaktorem powielającym.
2. Do procesu rozpadu paliwa i jego rozrodu wykorzystane zostaną neutrony szybkie.
3. Chłodzenie reaktora w oparciu o chłodziwo metaliczne.

3. Zasada działania reaktora TWR

Podstawową, wyróżniającą cechą reaktora TWR jest zdolność do przetworzenia żywnego materiału w użyteczne, rozszczepialne paliwo jądrowe na miejscu, bezpośrednio w reaktorze. W reaktorze następuje natychmiast proces rozpadu wytworzonego materiału rozszczepialnego.

TWR różni się od innych typów reaktorów tym, że pracuje z dużą sprawnością energetyczną, bez potrzeby wzbogacania paliwa, ani prowadzenia procesu jego przetwarzania na zewnątrz reaktora. Paliwem może być naturalny uran, zubożony uran, tor albo wypalone paliwo z reaktorów lekkowodnych.

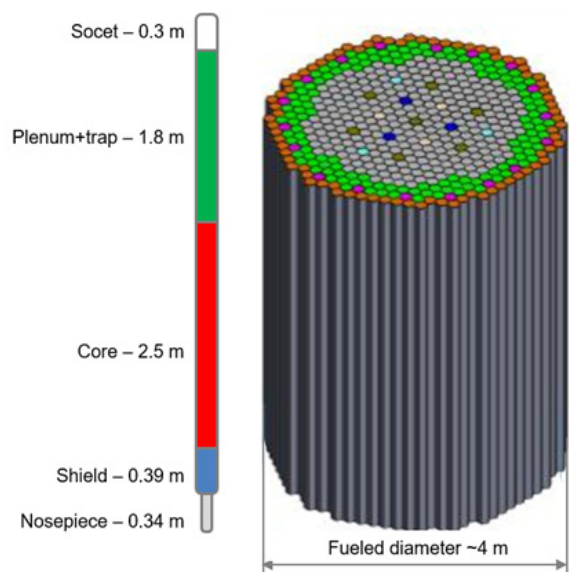


Rys. 1. Główne zespoły reaktora wędrującej fali [1]
Fig. 1. Main components of a traveling wave reactor [1]

Konstrukcyjnie reaktor TWR jest zbliżony do konwencjonalnego reaktora powielającego na szybkich neutronach, chłodzonego sodem (rys. 1). W obiegu chłodzenia TWR przewidziano trzy pętle: podstawowa pętla chłodząca reaktor, pośrednia pętla, zabezpieczająca przed wyciekami sodu radioaktywnego oraz trzecia pętla chłodzenia, wodna, w której powstaje para kierowana na turbiny. Pętla pośrednia jest barierą izolującą obieg radioaktywny sodu od obiegu parowego.

TWR jest reaktorem typu basenowego, w którym podstawowe elementy systemu reaktora (rdzeń reaktora, pompy elektromagnetyczne, wymienniki ciepła) są umieszczone w dużym zbiorniku płynnego sodu pod niskim ciśnieniem. Korpus reaktora jest chroniony zewnętrzną obudową bezpieczeństwa.

Założono, że TWR będzie używał technologii typowych dla powielających reaktorów z kilkoma wyjątkami. Pręty paliwowe zostały zaprojektowane tak, aby umożliwić wentylację powstających w nich gazów w czasie pracy, do pierwszego chłodzącego obiegu sodu. W klasycznych rozwiązaniach pręty paliwowe są zamknięte szczelnie. Wentylacja pozwoli na głębokie wypalenie paliwa umożliwiając 40 lat pracy. W TWR będą stosowane kanały paliwowe innego typu niż w dotychczas używanych reaktorach, ich geometria będzie inna. Materiały stosowane do budowy rdzenia reaktora są specjalnie opracowanymi stopami stali poprawiającymi reaktywność.

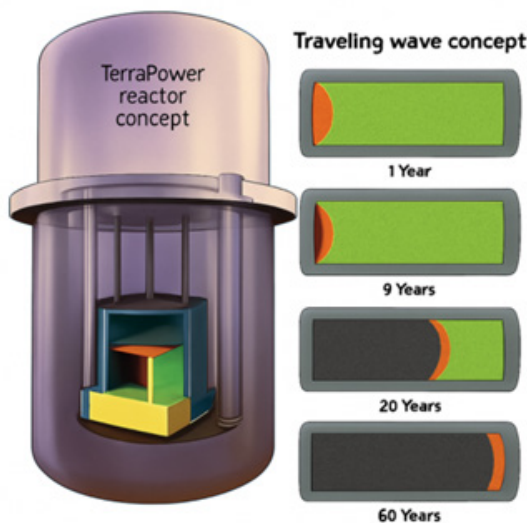


Rys. 2. Rdzeń reaktora TWR (wymiarzy dla obliczeniowej mocy nominalnej 1000 MW) oraz pręt paliwowy [2]

Fig. 2. TWR reactor core (dimensions for a rated power of 1000 MW) and fuel rod [2]

W reaktorze TWR w rdzeniu paliwowym znajduje się niewielka ilość prętów z paliwa rozszczepialnego U235 (rys. 2). Dookoła nich są umieszczone pręty zawierające nierozszczepialny U238. Po uruchomieniu reaktora reakcja rozszczepiania rozpoczyna się najpierw w prętach z U235. Równocześnie w przyległych do nich prętach z uranem U238 następuje przemiana materiału rozrodzonego w Pu239, czyli wspaniałe paliwo jądrowe. Pluton następnie podlega rozpadowi generując nowe neutrony oraz wydzielając ciepło. Powoduje też przemianę U-238 w kolejnych prętach

paliwowych w rozszczepialny U235 lub pluton. Prędkość rozszczepienia i jego intensywność będzie regulowana, podobnie jak w istniejących klasycznych reaktorach, przez zmianę położenia w rdzeniu prętów regulacyjnych.



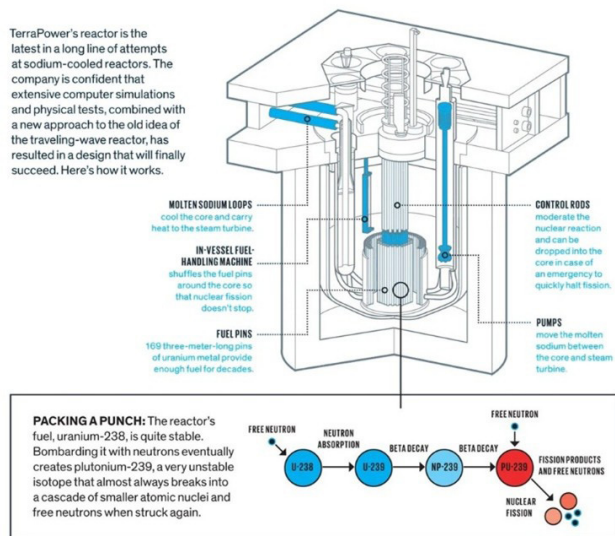
Rys. 3. Ideowa zasada pracy reaktora TWR: paliwo (zubożony uran) w hexagonalnych kanałach paliwowych, kolor zielony reprezentuje nieużyte paliwo, czarny zużyte paliwo, pomarańczowy falę rozpadu. Na podstawie [3]

Fig. 3. The ideological principle of operation of the TWR reactor: fuel (depleted uranium) inside the hexagonal pillars, green represents unused fuel, black spent fuel, orange fission wave. Based on [3]

W reaktorze następuje powolne przesuwanie strefy rozszczepienia paliwa w rdzeniu (rys. 3). Ta wędrująca fala, do której odnosi się nazwa reaktora, „przemieszcza się” przez rdzeń reaktora w kierunku promieniowym z prędkością zaledwie jednego centymetra na rok. Fala rozszczepienia wędruje przez rdzeń tworząc paliwo na bieżąco. TWR nie wymaga wyjmowania paliwa z rdzenia reaktora i przekształcania go w nowe paliwo. Wypalenie prętów najbliższych rdzenia reaktora spowoduje, że urządzenie sterujące umieszczone obok rdzenia reaktora przesuwa je w najdalszy koniec palety z prętami, wstawiając na ich miejsce pręty, w których zaczęła zachodzić reakcja (tzw. handling machine – rys. 4). Zbiornik reaktora w tym czasie pozostaje zamknięty, bez przerwania pracy reaktora.

Przy pracy TWR powstaje nowe paliwo oraz materiały odpadowe (np.ubożony uran). Stan taki pozwala na długotrwałą, samowystarczającą pracę reaktora przez dziesięciolecia, eliminując potrzebę częstego uzupełniania paliwa i utylizacji odpadów. Reaktor nie wymaga wymiany prętów, dopóki we wszystkich nie wypali się paliwo, co powinno trwać według obliczeń, w zależności od wielkości reaktora i ilości prętów, od 40 do 60 lat. TWR potencjalnie może zużywać odpady radioaktywne z innych reaktorów lububożony uran, co zmniejsza ryzyko proliferacji broni atomowej.

Głównym problemem przy projektowaniu reaktora TWR jest dobór materiałów na zbiornik reaktora, rury z chłodziwem oraz na osłony prętów paliwowych. Dostępne stopy metali nie są w stanie pracować przez kilkadziesiąt lat w środowisku silnego promieniowania panującego w reaktorze z wędrującą falą.



Rys. 4. Schemat działania TWR [4]
Fig. 4. TWR operation diagram [4]

4. Bezpieczeństwo pracy projektowanego reaktora

W projektowanym reaktorze TWR przewidziano kilka poziomów ochrony zapewniających wielopłaszczyznowe bezpieczeństwo pracy reaktora. Reaktor TWR będzie wyposażony w system kontroli reaktywności oraz wielokrotnie redundantny, automatyczny system wyłączania awaryjnego. Gdyby reaktor nie został wyłączony ani przez pręty regulacyjne, ani przez pręty awaryjne, rdzeń reaktora TWR powinien się ustabilizować na poziomie mocy bliskiej zeru. Po wyłączeniu awaryjnym reaktor TWR ma układ stosunkowo prostego odprowadzanie ciepła z paliwa. Reaktor TWR będzie wykorzystywał do odprowadzania ciepła duży zbiornik niskociśnieniowego chłodziwa sodowego. Niskie ciśnienie, wysoka temperatura wrzenia chłodziwa sodowego oraz redundantne zbiorniki podziemne zdecydowanie zmniejszają ryzyko awarii związanej z utratą chłodziwa. Umieszczenie reaktora poniżej poziomu gruntu zwiększy bezpieczeństwo działania.

Przewidziano także zestaw czterech oddzielnych bezpośrednich, pomocniczych układów chłodzenia reaktora tzw. DRACS (direct reactor auxiliary cooling systems). Każdy DRACS składa się z prostej pętli chłodziwa z naturalną cyrkulacją, w której jeden wymiennik ciepła odprowadza ciepło z pierwotnego chłodziwa, a drugi wymiennik ciepła odprowadza to ciepło do atmosfery. Każde dwie pętle DRACS z czterech wystarczają do usunięcia całego ciepła rozpadu.

Reaktor transferuje wytworzone ciepło do stopionej soli, która może być magazynowana w zbiornikach. Nagromadzona energia w soli ma zostać wykorzystana do wytworzenia pary zasilającej turbiny. Technologia magazynowania może zwiększyć (w razie potrzeby) moc wyjściową systemu. Możliwość magazynowania energii pozwala elektrowni na bezproblemową integrację z odnawialnymi źródłami energii.

W projekcie przyjęto rozdzielenie wyspy energetycznej od bloku jądrowego. Gwarantuje to pełne oddzielenie zintegrowanych systemów magazynowania energii i produkcji energii od części jądrowej elektrowni. Rozdzielenie pozwala zespołom eksploatacyjnym na obsługę istotnych zespołów elektrowni, takich jak

turbiny parowe, generatory i zbiorniki soli, poza strefą kontroli jądrowej. Jest to bezpieczniejsze rozwiązanie niż układ połączonej i obniży koszty budowy i eksploatacji.

5. Podsumowanie

Idea reaktorów TWR ma wprowadzić liczne ulepszenia w wielu obszarach. Z punktu widzenia bezpieczeństwa i zrównoważonego rozwoju technologia TWR przedstawia następujące zalety względem konwencjonalnej energetyki jądrowej:

- gospodarka odpadami – reaktor TWR umożliwia „wypalanie” niebezpiecznych odpadów radioaktywnych, w tym plutonu, co znacząco ogranicza ich ilość na składowiskach oraz redukuje ryzyko proliferacji broni nuklearnej,
- efektywność energetyczna – dzięki fali rozszczepienia przemieszczającej się przez rdzeń, system może pracować z wysoką efektywnością nieprzerwanie przez 40–60 lat bez konieczności wymiany lub zewnętrznego wzbogacania paliwa,
- pasywne bezpieczeństwo – wykorzystanie niskociśnieniowego chłodziwa sodowego o wysokiej temperaturze wrzenia oraz redundantnych, naturalnych pętli chłodzenia DRACS minimalizuje ryzyko awarii związanych z utratą chłodziwa,
- integracja z OZE – zastosowanie magazynów ciepła w stopionej soli pozwala na elastyczne dostosowanie produkcji energii do potrzeb sieci i bezproblemową integrację z od-

nawialnymi źródłami energii,

- optymalizacja kosztów – rozdzielenie wyspy jądrowej od konwencjonalnej części energetycznej (turbiny, generatory) pozwala na prowadzenie prac serwisowych poza strefą kontroli jądrowej, co wymiennie obniża koszty eksploatacji.

6. Bibliografia

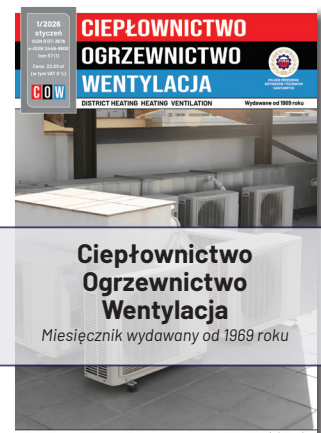
- [1] Gilleland, J., Petroski, R., & Weaver, K. (2016). The traveling wave reactor: design and development. *Engineering*, 2(1), 88-96. <https://doi.org/10.1016/J.ENG.2016.01.024>
- [2] Ahlfeld, C.E., Burke, T.M., Ellis, T.S., Hejzlar, P., Weaver, K., Whitmer, C., Gilleland, J.R., Cohen, M.E., Johnson, B.C., Mazurkiewicz, S.M., McWhirter, J.D., Odedra, A., Touran, N.W., Davidson, C., Walter, J., Zimmerman, G.B., Weaver, T., Schweiger, P., & Russick, R. (2011). Conceptual Design of a 500 MWe Traveling Wave Demonstration Reactor Plant
- [3] TerraPower. (2020). Sustainable Living through Nuclear Energy. All Sustainable Solutions, <https://allsustainable-solutions.com/terrapower-sustainable-living-through-nuclear-energy-and-science> (dostęp: 27 stycznia 2026).
- [4] Kozioł, M. (2018). TerraPower’s Nuclear Reactor Could Power the 21st Century. The traveling-wave reactor and other advanced reactor designs could solve our fossil fuel dependency. *IEEE Spectrum*, <https://spectrum.ieee.org/terrapowers-nuclear-reactor-could-power-the-21st-century> (dostęp: 27 stycznia 2026).



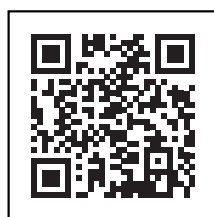
Czasopisma Polskiego Zrzeszenia Inżynierów i Techników Sanitarnych w nowej odsłonie



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



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



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



ORLEN zwiększa wydobyć. Złoże w Rózańsku włączone do produkcji

www.orlen.pl



ORLEN rozpoczął eksploatację złoża Rózańsko w województwie zachodniopomorskim, którego zasoby gazu ziemnego szacowane są na 1,2 mld m³. Inwestycja jest powiązana z rozbudową Kopalni Ropy Naftowej i Gazu Ziemnego Dębno, co pozwala również zwiększyć wydobyć z innych, już eksploatowanych złóż.



Źródło: materiały własne ORLEN S.A.

– Krajowe wydobyć gazu i ropy to jeden z filarów naszego bezpieczeństwa energetycznego. Obecnie pozyskujemy w Polsce około jedną piątą potrzebnego nam gazu ziemnego – to blisko 3,5 mld m³ rocznie. W kolejnych latach, wraz ze wzrostem zapotrzebowania na ten surowiec, nasza produkcja będzie systematycznie rosła, aby osiągnąć 4 mld m³ w 2030 roku. Surowce, które wydobywamy, pracują na rzecz całej gospodarki – gaz zasila energetykę i ciepłownictwo, ropa trafia do krajowych instalacji petrochemicznych i rafineryjnych, będąc podstawą m.in. do produkcji paliw i tworzyw, a siarka stanowi istotny komponent w produkcji nawozów sztucznych czy opon – mówi **Wiesław Prugar, Członek Zarządu ORLEN ds. Upstream**.

Inwestycja w Rózańsku przyczyni się do zwiększenia krajowego wydobyć gazu ziemnego nawet o 130 mln m³ rocznie. ORLEN będzie prowadził wydobyć z tego złoża przez najbliższe 20 lat, a więc w czasie, gdy zapotrzebowanie krajowej



Źródło: materiały własne ORLEN S.A.

gospodarki na gaz ziemny będzie największe. Gaz z Rózańska zasili przede wszystkim elektrociepłownię w Kostrzynie nad Odrą i Gorzowie Wielkopolskim. Ropa naftowa i płynna siarka, produkowana m.in. dzięki nowej instalacji odsiarczającej gaz, popłyną do polskiego przemysłu.

Zagospodarowanie złoża obejmowało modernizację trzech istniejących na nim otworów produkcyjnych z rozbudową instalacji, a także budowę nowego rurociągu, pozwalającego na połączenie złoża z jedną z największych instalacji wydobywczych w kraju – Kopalnią Ropy Naftowej i Gazu Ziemnego Dębno. Została ona rozbudowana o blok kogeneracyjny o mocy 8 MW, zasilany gazem z okolicznych złóż. Zapewni to kopalni pełne pokrycie zapotrzebowania na energię elektryczną i ciepło technologiczne, a nadwyżki będą trafiały na rynek. Rozbudowa umożliwiła również zwiększenie wydobyć z znajdującego się w pobliżu złoża Cychry.



Źródło: materiały własne ORLEN S.A.

Wzmocnienie krajowego wydobyć wpisuje się w strategię ORLEN 2035, zakładającą wzrost produkcji gazu w Polsce do 4 mld m³ rocznie w perspektywie 2030 roku. Jednocześnie Grupa ORLEN rozwija projekty na Norweskim Szelfie Kontynentalnym i planuje kolejne inwestycje zagraniczne, aby osiągnąć poziom 12 mld m³ gazu z własnych złóż do końca dekady.



Źródło: materiały własne ORLEN S.A.



TechMedis – platforma współpracy nauki, technologii i praktyki dla bezpiecznego środowiska w obiektach ochrony zdrowia

Rozwój nowoczesnych technologii instalacyjnych oraz rosnące wymagania w zakresie bezpieczeństwa epidemiologicznego, efektywności energetycznej i zrównoważonego gospodarowania zasobami sprawiają, że infrastruktura techniczna obiektów ochrony zdrowia

staje się jednym z kluczowych elementów systemu opieki medycznej. Szpitale i inne placówki medyczne należą do najbardziej wymagających typów budynków pod względem instalacyjnym. Funkcjonowanie takich obiektów wymaga nie tylko spełnienia rygorystycznych norm sanitarnych, lecz także zapewnienia niezawodnej pracy instalacji HVAC, systemów wodno-kanalizacyjnych, gazów medycznych czy systemów gospodarowania odpadami. W odpowiedzi na te potrzeby powstała inicjatywa TechMedis – Kształtowanie zdrowego i bezpiecznego środowiska w obiektach ochrony zdrowia, której celem jest integracja środowiska naukowego, branży instalacyjnej oraz sektora medycznego.

Główną ideą projektu TechMedis jest stworzenie aktywnej platformy współpracy pomiędzy trzema podstawowymi środowiskami: nauką i sektorem badań oraz rozwoju (B+R), instytucjami ochrony zdrowia oraz specjalistami z dziedziny inżynierii środowiska. W praktyce oznacza to budowę przestrzeni wymiany wiedzy, doświadczeń i technologii pomiędzy badaczami, lekarzami, projektantami instalacji sanitarnych, wykonawcami oraz osobami odpowiedzialnymi za eksploatację infrastruktury technicznej budynków medycznych.

Założeniem projektu jest wykorzystanie potencjału interdyscyplinarnej współpracy w celu poprawy jakości środowiska wewnętrznego w placówkach ochrony zdrowia. Dotyczy to zarówno komfortu pacjentów i personelu, jak i zapewnienia wysokiego poziomu bezpieczeństwa epidemiologicznego oraz efektywnego zarządzania energią i zasobami. Integracja wiedzy akademickiej z doświadczeniami praktyków może przyczynić się do opracowywania dobrych praktyk dotyczących rozwiązań technologicznych w infrastrukturze medycznej.

Istotnym elementem projektu jest także internetowa platforma informacyjno-edukacyjna dostępna pod adresem techmedis.pl, która pełni funkcję repozytorium wiedzy dotyczącej infrastruktury technicznej obiektów ochrony zdrowia. W ramach serwisu udostępniana jest Baza wiedzy, zawierająca podsumowania stanu wiedzy dotyczące funkcjonowania instalacji sanitarnych w budynkach medycznych.

Zgromadzone materiały zostały pogrupowane tematycznie oraz dostosowane do różnych grup odbiorców – inżynierów, kadry technicznej i administracyjnej placówek medycznych, personelu medycznego, a także pacjentów i odwiedzających. W części poświęconej zagadnieniom technicznym publikowane są artykuły dotyczące między innymi systemów wentylacji i klimatyzacji

w obiektach ochrony zdrowia, instalacji wodociągowych i kanalizacyjnych, systemów gazów medycznych, ogrzewnictwa oraz zagadnień związanych z gospodarką odpadami medycznymi.

Platforma przedstawia również materiały o charakterze popularyzatorskim i edukacyjnym, skierowane do użytkowników placówek medycznych. Wyjaśniają one m.in. znaczenie systemów wentylacji i filtracji powietrza w szpitalach oraz rolę odpowiedniej wymiany powietrza w przychodniach i innych budynkach ochrony zdrowia. Dzięki temu platforma pełni nie tylko funkcję specjalistycznego repozytorium wiedzy technicznej, lecz także narzędzia popularyzacji wiedzy na temat znaczenia infrastruktury technicznej dla bezpieczeństwa zdrowotnego.

Ostatnie materiały dodane do Bazy Wiedzy:

- Ultra czysta woda w jednostkach medycznych a biofilmy w instalacjach końcowych (point-of-use) – problem niedoszacowań
- Wpływ warunków hydraulicznych na rozwój biofilmu w instalacjach wodociągowych
- Stopniowanie filtracji w systemach wentylacji i klimatyzacji pomieszczeń służby zdrowia
- Zagrożenia i ochrona zdrowia personelu w kontakcie z odpadami z terapii onkologicznych
- Wytyczne dla kadry medycznej i pacjentów w zakresie stosowania oczyszczaczy powietrza w placówkach ochrony zdrowia
- Ambulatoryjna opieka zdrowotna w perspektywie zagrożeń infekcyjnych
- Zamgławianie jako metoda dezynfekcji powierzchni
- Usytuowanie umywalk jako element przestrzegania higieny rąk w szpitalach
- Niewidzialni pasażerowie szpitala - Od kurtki do łóżka pacjenta – dławczego okrycia wierzchnie, maseczki i fartuchy mają znaczenie
- Możliwości ograniczenia strumienia powietrza wentylującego
- Odpady o właściwościach potencjalnie zakaźnych z obszarów pozamedycznych
- Szpital – miejsce leczenia czy źródło zagrożeń?
- Bezpieczne zachowanie przy kontakcie z wodą i ściekami w placówkach ochrony zdrowia: aspekty zdrowotne i profilaktyczne
- Specjalistyczna armatura w szpitalach – jak ograniczyć ryzyko mikrobiologiczne?

Zachęcamy do odwiedzania strony www.techmedis.pl. Platforma jest otwarta dla wszystkich zainteresowanych pogłębianiem wiedzy oraz wymianą doświadczeń w obszarze infrastruktury technicznej ochrony zdrowia i może stanowić wartościowe źródło informacji zarówno dla praktyków branży instalacyjnej, jak i dla przedstawicieli środowiska medycznego i naukowego.

Zespół TechMedis

Publikacja dofinansowana ze środków budżetu państwa w ramach programu Ministra Edukacji i Nauki/Ministra Nauki i Szkolnictwa Wyższego pod nazwą „Nauka dla Społeczeństwa II” nr projektu Nds-II/SN/0008/2024/01, kwota dofinansowania 775 500,00 zł, całkowita wartość projektu 775 500,00 zł.



Nadchodzące Wydarzenia

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

Szkolenie: Ogólne zasady i przepisy regulujące projektowanie sieci gazowych. Propozycje zmian w przepisach regulujących projektowanie i eksploatację sieci gazowych

Seminarium online dotyczące aktualnych zasad i propozycji zmian w przepisach projektowania sieci gazowych.

Wykładowca: Henryk Kurek

Program obejmuje omówienie zmian i zasad regulacyjnych dla projektowania i eksploatacji sieci gazowych.

Termin: 8 kwietnia 2026 r. godz. 11:00-14:00

Miejsce: szkolenie online

Szczegóły: <https://www.pzits.com.pl/index.php/szkolenia-seminaryjne>

Konferencja NOVA WODA 2026

Z przyjemnością informujemy, że Polskie Zrzeszenie Inżynierów i Techników Sanitarnych objęło patronatem branżowym I Ogólnopolską Konferencję Samorządowych Praktyków „NOVA WODA”. Wydarzenie poświęcone jest nowoczesnemu podejściu do gospodarki wodno-ściekowej oraz zmianie sposobu postrzegania oczyszczalni ścieków — z obiektów generujących koszty w instalacje odzyskujące wodę, energię i cenne surowce, stanowiące istotny element gospodarki obiegu zamkniętego.

Tematyka konferencji obejmuje zagadnienia związane z ponownym wykorzystaniem wody, zagospodarowaniem osadów ściekowych, poprawą efektywności energetycznej oczyszczalni, ograniczaniem kosztów eksploatacyjnych oraz wdrażaniem technologii umożliwiających odzysk zasobów. Szczególny nacisk zostanie położony na praktyczne rozwiązania możliwe do zastosowania w jednostkach samorządu terytorialnego, w tym na planowanie inwestycji wodno-kanalizacyjnych w warunkach zmieniających się wymagań prawnych, rosnących kosztów energii oraz konieczności dostosowania infrastruktury do wyzwań klimatycznych.

Konferencja ma charakter praktyczny i skierowana jest przede wszystkim do przedstawicieli samorządów, przedsiębiorstw wodociągowo-kanalizacyjnych, projektantów, eksploatorów infrastruktury sanitarnej, a także osób odpowiedzialnych za planowanie i realizację inwestycji w sektorze komunalnym. W programie przewidziano wystąpienia ekspertów, prezentacje dobrych praktyk oraz dyskusje dotyczące nowych kierunków rozwoju gospodarki wodno-ściekowej w Polsce.

Organizatorami wydarzenia są Uniwersytet Przyrodniczy we Wrocławiu oraz firma NOVA BR, a konferencja stanowi forum wymiany doświadczeń pomiędzy środowiskiem naukowym, praktykami oraz przedstawicielami administracji publicznej, poszukującymi efektywnych i nowoczesnych rozwiązań w obszarze gospodarki wodnej.

Termin: 13-14 kwietnia 2026 r.

Miejsce: ul. Plac Grunwaldzki 24A, Aula I piętro, Wrocław

Szczegóły: <https://www.konferencjanovawoda.pl>



Szkolenie: Przygotowanie projektu sieci ciepłowniczej preizolowanej w osłonie PEHD układanej bezpośrednio w ziemi

Szkolenie PZITS online poświęcone projektowaniu sieci ciepłowniczej z rur preizolowanych.

Wykładowca: Artur Starobrat

Program obejmuje zasady projektowania i stosowania systemów preizolowanych w terenie.

Termin: 14 kwietnia 2026 r. godz. 11:00-14:00

Miejsce: szkolenie online

Szczegóły: <https://www.pzits.com.pl/index.php/szkolenia-seminaryjne>

Szkolenie: Aktualne akty prawne podstawą prawidłowo realizowanej inwestycji

Szkolenie poświęcone będzie aktualnym wymaganiom prawnym dotyczącym projektowania i realizacji budowy ochronnych oraz zasadom przygotowania projektu technologicznego jako elementu dobrej praktyki projektowej. Omówione zostaną obowiązujące warunki techniczne, podstawowe definicje oraz kategorie budowli ochronnych, a także wymagania związane z zapewnieniem bezpieczeństwa użytkowników. W programie przewidziano zagadnienia dotyczące wyposażenia obiektów w niezbędne instalacje i urządzenia, w tym węzły sanitarne, urządzenia filtrowentylacyjne, systemy hermetyzacji, przepusty oraz zasilanie awaryjne. Przedstawione zostaną również zasady zapewnienia niezawodności działania instalacji, w szczególności w zakresie instalacji sanitarnych, wyrzutni powietrza oraz systemów detekcji skażeń. Uzupełnieniem szkolenia będzie omówienie przykładowego rozwiązania projektowego, ilustrującego praktyczne zastosowanie wymagań technicznych w projektowaniu budowli ochronnych.

Wykładowca: mgr inż. arch. Michał Pietrzak (SIBO)

Termin: 16 kwietnia 2026 r. godz. 11:00-14:00

Miejsce: szkolenie online

Szczegóły: <https://www.pzits.com.pl/index.php/szkolenia-seminaryjne>

Forum Wody – Temat przewodni: „Bezpieczeństwo wodne w erze cyfrowej rewolucji”

Forum Wody organizowane przez Polskie Zrzeszenie Inżynierów i Techników Sanitarnych Oddział w Białymstoku, będzie jedynym wydarzeniem poświęconym aktualnym wyzwaniom związanym z gospodarką wodną, infrastrukturą sanitarną oraz bezpieczeństwem wodnym regionu.

Wydarzenie skierowane jest do przedstawicieli administracji publicznej, przedsiębiorstw branży sanitarnej oraz środowiska naukowego.

W programie przewidziane są panel dyskusyjny, wystąpienia eksperckie oraz sesje networkingowe umożliwiające bezpośredni dialog pomiędzy uczestnikami.

Celem Forum jest stworzenie przestrzeni do merytorycznej dyskusji, wymiany doświadczeń oraz budowania współpracy pomiędzy samorządami, biznesem i nauką.

Termin: 17 kwietnia 2026 r. godz. 9:00-16:00

Miejsce: Sala Konferencyjna Domu Technika FSNT NOT w Białymstoku, ul. M. Skłodowskiej Curie 2, Białystok.

Szczegóły: <https://pzits.bialystok.pl/i-forum-wody/>



Szkolenie: Wentylacja obiektów obrony cywilnej

Szkolenie obejmuje zagadnienia związane z wymaganiami stawianymi systemom wentylacji w budowlach ochronnych, w tym w miejscach doraźnego schronienia (MDS). Omówione zostaną podstawowe zasady podziału na strefy wentylacyjne, dobór urządzeń oraz wybrane kryteria techniczne, które powinny być spełnione przy projektowaniu instalacji zapewniających bezpieczeństwo użytkowników. W programie przewidziano również przedstawienie przykładowych rozwiązań wentylacji stosowanych w MDS, w tym przykład projektowy miejsca doraźnego schronienia zlokalizowanego w garażu podziemnym, wraz z omówieniem zasad lokalizacji czerpni i wyrzutni powietrza.

Wykładowca: dr hab. inż. Małgorzata Król, Włodzimierz Łącki

Termin: 22 kwietnia 2026 r. godz. 11:00-14:00

Miejsce: szkolenie online

Szczegóły: <https://www.pzits.com.pl/index.php/szkolenia-seminaryjne>

Szkolenie: Instalacje sanitarne w obiektach obrony cywilnej

Szkolenie obejmuje zagadnienia związane z wymaganiami technicznymi dotyczącymi instalacji wodociągowych i kanalizacyjnych w budowlach ochronnych, w odniesieniu do obowiązujących przepisów, w tym rozporządzenia określającego warunki techniczne, jakim powinny odpowiadać budowle ochronne, oraz zasady ich usytuowania i użytkowania.

Omówione zostaną warunki projektowania, rozwiązania techniczne oraz zasady wykonania instalacji wodociągowych i kanalizacyjnych w obiektach ochrony cywilnej, ze szczególnym uwzględnieniem zapewnienia niezawodności działania w sytuacjach zagrożenia. Przedstawione zostaną również wymagania dotyczące zaopatrzenia schronów w wodę, w tym stosowania studni, urządzeń do uzdatniania oraz sposobów zabezpieczenia przyłączy wodociągowych i odprowadzenia ścieków.

W programie uwzględniono także rozwiązania dotyczące systemów kanalizacyjnych stosowanych w budowlach ochronnych, w tym zasady stosowania kanalizacji żeliwnej oraz wymagania związane z bezpiecznym odprowadzaniem ścieków z obiektów obrony cywilnej.

Wykładowca: Wojciech Mordec (NAVITEL), Tomasz Obratański (RSP), Zbigniew Sochacki (Kessel)

Termin: 15 maja 2026 r. godz. 11:00-14:00

Miejsce: szkolenie online

Szczegóły: <https://www.pzits.com.pl/index.php/szkolenia-seminaryjne>

PRZYSZŁOŚĆ BRANŻY INSTALACYJNEJ ZACZYNA SIĘ W ŻYWCU

Branżowe Centrum Umiejętności nr 2 w Żywcu staje się kluczowym punktem na mapie edukacji zawodowej w regionie. 12 lutego odbyło się tam pierwsze z cyklu spotkań poświęconych rozwiązaniom hybrydowym w ogrzewnictwie – wydarzenie, które połączyło ekspercką wiedzę teoretyczną z praktycznym pokazem najnowocześniejszych instalacji.



Merytorycznie o optymalizacji kosztów ogrzewania

Spotkanie pt. „Rozwiązania hybrydowe – droga do optymalizacji kosztów ogrzewania budynku” spotkało się z ogromnym zainteresowaniem. Dzięki formule hybrydowej, w wydarzeniu wzięła udział liczna grupa uczestników zarówno stacjonarnie, jak i online.

Na zaproszenie BCU swoje doświadczenie i wiedzę zaprezentowali uznani specjaliści rynku grzewczego: **Janusz Starościk** – Prezes Stowarzyszenia Producentów i Importerów Urządzeń Grzewczych, **Piotr Pacholek** – ekspert firmy Hewanex, **Tomasz Mitras** – przedstawiciel firmy Termet. Prelegenci szczegółowo omówili aktualne regulacje prawne, dynamiczne zmiany rynkowe oraz najnowsze rozwiązania technologiczne w zakresie systemów hybrydowych.

Po części teoretycznej uczestnicy mieli okazję zobaczyć **działającą instalację hybrydową** funkcjonującą w BCU – rozwiązanie, które w praktyce pokazuje, jak skutecznie łączyć technologie w celu optymalizacji kosztów ogrzewania.

Marzec pod znakiem kolejnych Spotkań Hybrydowych

BCU nie zwalnia tempa. W marcu zaplanowano kolejne wydarzenia poświęcone nowoczesnym systemom grzewczym:

| Termin | Eksperci | Temat Spotkania |
|----------------------------------|----------------------------|--|
| 12 marca 2026, godz. 10:00-12:00 | KAN sp. z o.o. | „Ogrzewanie i chłodzenie płaszczynowe – rozwiązania na przykładzie systemów KAN-Therm.” |
| 19 marca 2026, godz. 11:00-13:00 | SPIUG Galmet Caleffi | „Ogrzewanie domu – mądre wybory – promocja nowoczesnych i efektywnych rozwiązań w branży OZE.” |

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

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

ul. Szkolna 2, 34-300 Żywiec
33 861 21 75
bcu@zsb.edu.pl

www.bcu.zsbd.edu.pl



Rekrutacja na szkolenia trwa

BCU w Żywcu prowadzi również nabór na **bezpłatne szkolenia zawodowe** odpowiadające aktualnym potrzebom rynku.

SZKOLENIA DLA OSÓB DOROSŁYCH:

- Montaż i sterowanie pracą powietrznych pomp ciepła
- Montaż instalacji wodociągowej
- Montaż i eksploatacja instalacji centralnego ogrzewania
- Kontrolowana eksploatacja kotłów
- Sterowanie instalacjami grzewczymi
- Nowoczesne technologie wykonania instalacji sanitarnych

SZKOLENIA DLA NAUCZYCIELI ZAWODU:

- Kontrolowana eksploatacja kotłów
- Nowoczesne technologie wykonania instalacji sanitarnych

Edukacja przyszłości dzieje się tu i teraz

Branżowe Centrum Umiejętności nr 2 w Żywcu konsekwentnie **rozbudowuje i unowocześnia swoją bazę dydaktyczną**. Najnowszym elementem wyposażenia są **dwa zaawansowane symulatory spawania** w technologii rozszerzonej rzeczywistości marki Soldamatic. Zakup urządzeń został sfinansowany przez organ prowadzący – Powiat Żywiecki, natomiast za dostawę i wdrożenie sprzętu odpowiadały firmy Abicor Binzel oraz RYWAL-RHC.



Równolegle zakończono **rozbudowę pracowni pomp ciepła**. Przestrzeń została wyposażona w nowoczesne urządzenia

oraz komponenty wykorzystywane w instalacjach grzewczych, gazowych i sanitarnych, co znacząco podniosło potencjał dydaktyczny Branżowego Centrum Umiejętności. Rozwój infrastruktury BCU jest efektem ścisłej współpracy ze środowiskiem branżowym reprezentującym sektor instalacyjno-grzewczy. W realizację przedsięwzięcia zaangażowały się firmy: Instalmax, MCD Electronics, Purmo Polska, KAN, Hewanex, Ferro oraz Stowarzyszenie Producentów i Importerów Urządzeń Grzewczych.

Dzięki tak nowoczesnemu zapleczu, BCU w Żywcu kształci **kadry gotowe na wyzwania przyszłości**.

Nowy standard kształcenia zawodowego

Dynamiczny rozwój technologii wymaga również dynamicznego podejścia do edukacji. Branżowe Centrum Umiejętności nr 2 w Żywcu udowadnia, że współczesne kształcenie zawodowe może harmonijnie **łączyć wiedzę, praktyczne umiejętności oraz potrzeby rynku pracy**.

Spotkania branżowe, specjalistyczne szkolenia, nowoczesne zaplecze technologiczne – wszystko to tworzy przestrzeń, w której powstają kompetencje przyszłości.

Bo przyszłość branży instalacyjnej i technicznej zaczyna się od wiedzy.

A ta w Żywcu ma solidne fundamenty.