

Praca zbiorowa pod redakcją

Sebastiana **WERLE**

Joanny **FERDYN-GRYGIEREK**

MONOGRAFIA

OCHRONA KLIMATU I ŚRODOWISKA NOWOCZESNA ENERGETYKA Wybrane zagadnienia



Ochrona klimatu i środowiska
nowoczesna energetyka

PRIORYTETOWE OBSZARY BADAWCZE POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ



Politechnika
Śląska



UCZELNIA
BADAWCZA
INICJATYWA DOSKONALISZC

Gliwice 2023



**Praca zbiorowa pod redakcją
Sebastiana WERLE
Joanny FERDYN-GRYGIEREK**

**OCHRONA KLIMATU I ŚRODOWISKA
NOWOCZESNA ENERGETYKA
WYBRANE ZAGADNIENIA**

**WYDAWNICTWO POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ
GLIWICE 2023
UIW 48600**

Opiniodawcy

Prof. dr hab. inż. Agnieszka GENEROWICZ

Prof. dr hab. inż. Jarosław ZUWAŁA

Kolegium redakcyjne

REDAKTOR NACZELNY – Dr hab. inż. Barbara KULESZ, prof. PŚ

REDAKTOR DZIAŁU – Dr hab. inż. Jolanta GUMIŃSKA, prof. PŚ

SEKRETARZ REDAKCJI – Mgr Monika MOSZCZYŃSKA-GŁOWACKA

Wydano za zgodą

Rektora Politechniki Śląskiej

Redakcja językowa

Mgr Justyna SZMYT

Redakcja techniczna

Ewa TENEROWICZ

Projekt okładki

Maciej MUTWIL

ISBN 978-83-7880-929-6

© Copyright by

Wydawnictwo Politechniki Śląskiej

Gliwice 2023

SPIS TREŚCI

PRZEDMOWA.....	9
1. OKREŚLENIE ŹRÓDEŁ EMISJI CO ₂ NA ŚLĄSKU: ANALIZA JAKOŚCIOWA NA PODSTAWIE SKŁADU IZOTOPÓW STABILNYCH MŁODYCH PĘDÓW SOSNY <i>Barbara Sensuła</i>	11
2. ANALIZA PRZESTRZENNA ZANIECZYSZCZEŃ POWIETRZA NA OBSZARZE KAMPUSU POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ <i>Elwira Zajusz-Zubek, Zygmunt Korban</i>	24
3. STAN ZAGROŻENIA ŚRODOWISKA ANTROPOGENICZNEGO – PROPOZYCJA WYKORZYSTANIA METODY ANALIZY WIELOKRYTERIALNEJ <i>Elwira Zajusz-Zubek, Zygmunt Korban</i>	37
4. DŁUGOOKRESOWE POMIARY WPŁYWU DROGOWEJ TRASY ŚREDNICOWEJ NA STAN POWIETRZA W GLIWICACH <i>Walter Mucha</i>	48
5. NARAŻENIE NA DWUTLENEK AZOTU W CZASIE DOJAZDU DO PRACY ROWEREM W REJONIE GLIWIC <i>Anna Mainka, Aleksandra Malinowska, Julia Pfajfer, Witold J. Nocoń</i>	58
6. PROFILAKTYKA ZWIĄZANA Z REDUKCJĄ ZANIECZYSZCZENIA POWIETRZA PYŁAMI W ASPEKCIE OCENY RYZYKA ZDROWOTNEGO ZWIĄZANEGO ZE SZKODLIWYM ODDZIAŁYWANIEM PYŁU KOPALNIANEGO NA ORGANIZM CZŁOWIEKA – STUDIUM PRZYPADKU <i>Anna Morcinek-Słota</i>	69
7. REDUKCJA ZANIECZYSZCZENIA POWIETRZA GAZAMI, SUBSTANCJAMI NIEBEZPIECZNYMI I PYŁAMI POWSTAŁYMI PRZY DRAŻNIENIU TUNELI JAKO ELEMENT PROFILAKTYKI W PROCEDURZE OCENY RYZYKA ZAWODOWEGO <i>Anna Morcinek-Słota</i>	87

8. OCENA SKUTKÓW PODZIEMNEJ EKSPLOATACJI ZŁOŻA WĘGLA
KAMIENNEGO W BUDYNKU MIESZKALNYM
Justyna Orwat..... 99
9. WPŁYW TEMPERATURY I PH NA STABILNOŚĆ WYBRANYCH
HORMONÓW PŁCIOWYCH W PROCESIE ZATEŻANIA ICH
ROZTWORÓW
*Mirosława Grymel, Agata Wawrzkiwicz-Jałowiecka, Mateusz Pielok,
Miroslaw Cieślik, Julia Szreder, Beata Nowrot, Alicja Bargieła,
Sebastian Żabczyński, Joanna Wilk, Sylwia Bajkacz, Anna Lalik* 110
10. WYSTĘPOWANIE ANTYBIOTYKÓW REZERWOWYCH
W ŚRODOWISKU WODNYM
Joanna Wilk, Sylwia Bajkacz 125
11. BETONY LEKKIE Z KRUSZYWEM Z MATERIAŁÓW ODPADOWYCH
Barbara Słomka-Shupik, Tadeusz Kruczek, Nicole Kocierz 135
12. IZOLACJA I SZACOWANIE POTENCJAŁU WYKORZYSTANIA
BAKTERII ŚRODOWISKOWYCH DO PRODUKCJI
SAMONAPRAWIALNEGO GEOPOLIMERU – BADANIA WSTĘPNE
*Aleksandra Ziemińska-Buczyńska, Klaudia Sobczak, Natalia Wielgus,
Marcin Górski* 151
13. WYBRANE METODY BADAŃ MATERIAŁÓW FOTOWOLTAICZNYCH
I OGNIW SŁONECZNYCH
*Aleksandra Drygała, Małgorzata Muszyfaga-Staszuk, Marek Szindler,
Magdalena Szindler*..... 174
14. REDUKCJA KOSZTÓW ENERGETYCZNYCH PRZEWIETRZANIA PRZEZ
OPTIMALIZACJĘ SIECI WENTYLACYJNEJ I ZASTOSOWANIE
REKUPERACJI W PODZIEMNYM OBIEKCIE TURYSTYCZNYM
Krzysztof Słota, Zbigniew Słota..... 190
15. FREE-COOLING JAKO SPOSÓB NA PODNIESIENIE EFEKTYWNOŚCI
ENERGETYCZNEJ KLIMATYZACJI W GÓRNICTWIE PODZIEMNYM
Zbigniew Słota, Krzysztof Słota..... 211
16. STUDENCI O TRANSFORMACJI ENERGETYCZNEJ – WYNIKI
BADANIA ILOŚCIOWEGO
*Paweł Ruszkowski, Krzysztof Bodzek, Magdalena Wręczycka,
Mateusz Jasiński, Ivan Buzanov* 227

17. EFEKTY I ZALECENIA KAMPANII EDUKACYJNEJ NA TEMAT ZAPOBIEGANIA ZANIECZYSZCZENIOM ORAZ GOSPODARKI OBIEGU ZAMKNIĘTEGO, Z WYKORZYSTANIEM DOŚWIADCZEŃ CZYSTSZEJ PRODUKCJI I EMAS	
<i>Małgorzata Hordyńska</i>	247
18. MIKRODROBINY PLASTIKU W POMIESZCZENIACH	
<i>Nisarg Dipakkumar Mehta, Barbara Kozielska</i>	258
19. PONOWNE WYKORZYSTANIE TERENÓW POPRZEMYSŁOWYCH, PRZYKŁADY Z PRAKTYKI	
<i>Rafał Krzywoń</i>	269
20. ASPEKTY BEZPIECZEŃSTWA TRANSPORTU WODORU, AMONIAKU ORAZ MIESZANIN WODÓR/METAN I AMONIAK/WODÓR	
<i>Katarzyna Stolecka-Antczak, Andrzej Rusin</i>	282
21. BADANIA NAD TANIMI, NOWOCZESNYMI, ELEKTRONICZNYMI CZUJNIKAMI PYŁU W POWIETRZU	
<i>Tomasz Grychowski</i>	301
22. CASE STUDY: ZALEŻNOŚCI MIĘDZY JAKOŚCIĄ POWIETRZA WEWNĘTRZNEGO A FREKWENCJĄ UCZNIÓW SZKOŁY PODSTAWOWEJ	
<i>Aleksandra Lipczyńska, Karolina Pietrzyk, Anna Bulińska, Ewa Brągoszewska, Mirella Fuhrmann, Kacper Lassota, Aleksandra Pomykoł, Zuzanna Nowak, Nikola Dąbek</i>	313
STRESZCZENIE.....	326

CONTENTS

PREFACE	10
1. DETERMINATION OF SOURCES OF ANTHROPOGENIC CO ₂ EMISSIONS IN SILESIA (POLAND) AND QUANTITATIVE ANALYSIS BASED ON CARBON ISOTOPES COMPOSITION OF PINE NEEDLES <i>Barbara Sensuła</i>	11
2. SPATIAL ANALYSIS OF AIR POLLUTION ON THE CAMPUS OF THE SILESIA UNIVERSITY OF TECHNOLOGY <i>Elwira Zajusz-Zubek, Zygmunt Korban</i>	24
3. STATE OF THREAT TO THE ANTHROPOGENIC ENVIRONMENT – A PROPOSAL TO USE THE MULTI-CRITERIA ANALYSIS METHOD <i>Elwira Zajusz-Zubek, Zygmunt Korban</i>	37
4. LONG-TERM MEASUREMENTS OF THE IMPACT OF THE ROUTE DTŚ ON THE AIR CONDITION IN GLIWICE <i>Walter Mucha</i>	48
5. EXPOSURE TO NITROGEN DIOXIDE DURING BICYCLE COMMUTING IN THE REGION OF GLIWICE <i>Anna Mainka, Aleksandra Malinowska, Julia Pfajfer, Witold J. Nocoń</i>	58
6. PREVENTION RELATED TO THE REDUCTION OF DUST AIR POLLUTION IN TERMS OF HEALTH RISK ASSESSMENT OF HARMFUL EFFECTS OF MINE DUST ON THE HUMAN BODY – A CASE STUDY <i>Anna Morcinek-Słota</i>	69
7. REDUCTION OF AIR POLLUTION BY GASES, HAZARDOUS SUBSTANCES AND DUST FROM TUNNELLING AS A PREVENTIVE ELEMENT IN THE OCCUPATIONAL RISK ASSESSMENT PROCEDURE <i>Anna Morcinek-Słota</i>	87
8. ASSESSMENT OF THE EFFECTS OF UNDERGROUND EXPLOITATION OF HARD COAL DEPOSITS IN A RESIDENTIAL BUILDING <i>Justyna Orwat</i>	99

9. THE EFFECT OF TEMPERATURE AND PH ON THE STABILITY OF SEX HORMONES IN THE PROCESS OF CONCENTRATING THEIR SOLUTIONS	
<i>Mirosława Grymel, Agata Wawrzekiewicz-Jałowiecka, Mateusz Pielok, Mirosław Cieślak, Julia Szreder, Beata Nowrot, Alicja Bargieła, Sebastian Żabczyński, Joanna Wilk, Sylwia Bajkacz, Anna Lalik</i>	110
10. OCCURENCE OF RESERVE ANTIBIOTICS IN AQUATIC ENVIRONMENT	
<i>Joanna Wilk, Sylwia Bajkacz</i>	125
11. LIGHTWEIGHT CONCRETES WITH AGGREGATE FROM WASTE MATERIALS	
<i>Barbara Słomka-Słupik, Tadeusz Kruczek, Nicole Kocierz</i>	135
12. SOLATION AND POTENTIAL ASSESSMENT OF ENVIRONMENTAL BACTERIA FOR SELF-HEALING GEOPOLYMER USAGE – PRELIMINARY STUDIES	
<i>Aleksandra Ziemińska-Buczyńska, Klaudia Sobczak, Natalia Wielgus, Marcin Górski</i>	151
13. SELECTED RESEARCH METHODS FOR PHOTOVOLTAIC MATERIALS AND SOLAR CELLS	
<i>Aleksandra Drygala, Małgorzata Musztyfaga-Staszuk, Marek Szindler, Magdalena Szindler</i>	174
14. REDUCTION OF VENTILATION ENERGY COSTS THROUGH OPTIMISATION OF THE VENTILATION NETWORK AND USE OF RECUPERATION IN AN UNDERGROUND TOURIST FACILITY	
<i>Krzysztof Słota, Zbigniew Słota</i>	190
15. FREE-COOLING AS A MEANS OF IMPROVING THE ENERGY EFFICIENCY OF AIR CONDITIONING IN UNDERGROUND MINING	
<i>Zbigniew Słota, Krzysztof Słota</i>	211
16. STUDENTS ON THE ENERGY TRANSITION – RESULTS OF A QUANTITATIVE STUDY	
<i>Paweł Ruszkowski, Krzysztof Bodzek, Magdalena Wręczycka, Mateusz Jasiński, Ivan Buzanov</i>	227
17. EFFECTS AND RECOMMENDATIONS OF THE EDUCATIONAL CAMPAIGN ON POLLUTION PREVENTION AND THE CIRCULAR ECONOMY, USING EXPERIENCES OF CLEANER PRODUCTION AND EMAS	
<i>Małgorzata Hordyńska</i>	247

18. MICROPLASTICS IN INDOOR	
<i>Nisarg Dipakkumar Mehta, Barbara Kozielska</i>	258
19. REDEVELOPMENT/REUSE OF POSTINDUSTRIAL AREAS, CASES FROM PRACTICE	
<i>Rafał Krzywoń</i>	269
20. SAFETY ISSUES IN TRANSPORT OF HYDROGEN, AMMONIA AND HYDROGEN/METHANE AND AMMONIA/HYDROGEN MIXTURES	
<i>Katarzyna Stolecka-Antczak, Andrzej Rusin</i>	282
21. RESEARCH ON CHEAP, MODERN, ELECTRONIC DUST SENSORS IN THE AIR	
<i>Tomasz Grychowski</i>	301
22. CASE STUDY: RELATIONSHIPS BETWEEN INDOOR AIR QUALITY AND ATTENDANCE OF PRIMARY SCHOOL STUDENTS	
<i>Aleksandra Lipczyńska, Karolina Pietrzyk, Anna Bulińska, Ewa Brągoszewska, Mirella Fuhrmann, Kacper Lassota, Aleksandra Pomykoł, Zuzanna Nowak, Nikola Dąbek</i>	313
ABSTRACT.....	332

PRZEDMOWA

W ramach realizacji programu Inicjatywa Doskonałości – Uczelnia Badawcza, Politechnika Śląska kumuluje potencjał oraz znacząco rozwija współpracę wewnętrzną i zewnętrzną w sześciu Priorytetowych Obszarach Badawczych. Jednym z nich jest szósty Priorytetowy Obszar Badawczy (POB6) „Ochrona klimatu i środowiska, nowoczesna energetyka”.

Przedstawiana monografia prezentuje wybrane aspekty badań prowadzonych w ramach POB6 przez naukowców z Politechniki Śląskiej. W treści monografii znajdują się prace dotyczące, między innymi, ochrony powietrza wewnętrznego i zewnętrznego, wykorzystania odnawialnych źródeł energii, ochrony środowiska wodnego, procesów oczyszczania ścieków oraz technologii budownictwa energooszczędnego. Monografia będzie trwałym zapisem, dokumentującym działalność naukową w ramach POB6. Pozwoli na zapoznanie się z wynikami aktualnie prowadzonych badań przez szerokie grono odbiorców, będąc równocześnie ofertą badawczą dla otoczenia społeczno-gospodarczego oraz propozycją do współpracy naukowo-badawczej dla krajowych i zagranicznych jednostek naukowo-badawczych.

PREFACE

As part of the Excellence Initiative Program - Research University, the Silesian University of Technology consolidates its potential and significantly enhances internal and external collaboration within six Priority Research Areas. One of these areas is the sixth Priority Research Area (POB6) titled “Climate and Environmental Protection, Modern Energy”.

The presented monograph showcases selected aspects of research conducted within POB6 by scientists from the Silesian University of Technology. The monograph includes works related to, among others, indoor and outdoor air quality protection, the utilization of renewable energy sources, environmental water protection, wastewater treatment processes, and energy-efficient construction technologies. The monograph will serve as a lasting record, documenting research activities within POB6. It will enable a wide audience to familiarize themselves with the results of ongoing research, while also serving as research offering for the socio-economic environment and a proposal for scientific collaboration with domestic and international scientific research institutions.

1. DETERMINATION OF SOURCES OF ANTHROPOGENIC CO₂ EMISSIONS IN SILESIA (POLAND) AND QUANTITATIVE ANALYSIS BASED ON CARBON ISOTOPES COMPOSITION OF PINE NEEDLES

1.1. Introduction

The local carbon cycle is very important to understand the biological and chemical process and the different interactions in the environment. Human activities over the past two hundred years have significantly increased the amount of carbon in the atmosphere, by directly emitting it (eg, by fossil fuel combustions) or by changing ecosystems' ability to extract CO₂ from the atmosphere (eg, by deforestation) [1–5]. The carbon concentration, as well as the carbon isotopic composition of the Earth's atmosphere, has been modified by human activities. There are three carbon isotopes; two of them are stable (¹²C and ¹³C) whereas one of them is radioactive (¹⁴C). ¹²C is most abundant on Earth (approximately 98.89% of the atoms in one mole of carbon), whereas ¹³C is about 1.1% and ¹⁴C is the rarest (1 part in trillion). The carbon cycle is the biogeochemical cycle by which carbon is exchanged among the different reservoirs (such as, for example, the biosphere and atmosphere). The significant development of industry in the past century has caused significant changes in the global and local C isotopes cycle. The carbon isotopic composition of the atmosphere and biosphere has been modified inter alia by biomass burning and fossil fuel (e.g. coal, petroleum, and natural gas) combustion. Monitoring atmospheric CO₂ and/ or carbon isotope composition has been done either directly in the air or indirect- by analysis carbon isotopic composition of plants, inter alia Scots pine (*Pinus Sylvestris* L.) [1–23]. Review of the literature [19, 23–25] describes the pathway and associated fractionation of carbon isotopes in CO₂ during photosynthesis and respiration. The plant filters CO₂ from the air. During its life, a plant is in equilibrium with its surroundings by exchanging carbon with the atmosphere. Through photosynthesis, plants convert CO₂ and H₂O to glucose and thus to cellulose (C₆H₁₂O₆)_n, using light, and release oxygen to the atmosphere. The transport of saccharides is stopped when new needles start

growing and begins again when their formation is finished (mid-July). Until mid-July, annual needles are a source of carbon for new needles. In mid-July the ability of new needles to assimilate is similar to that of older needles. Several models of stable carbon isotopes during photosynthesis [23–25] describe fractionation that occurs due to diffusion in air and stomatal conductance, and fractionation caused by carboxylation (discrimination by RuBisCO). According to [24] carbon isotopes are not retranslocated after fixation in the structure of the needle (when the growth process is over).

However the analysis are just the first basic approach and can be dedicated mostly to quantitative analysis and analysis of the trend. To make detailed qualitative analysis more environmental factors should be taken into account. Not only isotopic fractionation in CO₂ due to human activities is reflected in $\delta^{13}\text{C}$ of the trees. There are also other external factors affecting the final carbon isotope composition of the plant, such as water availability, relative humidity, the effect of temperature fractionation, the effect of altitude fractionation. To avoid weather influences on the results, the sampling in selected sites was done on the same day in selected year.

1.2. Materials and methods

The sampling sites were located in a multisource pollution area in the southern part of Poland in Silesia (Fig. 1.1) that has been actively investigated since 2012 [26–30]. Scots pine is one of the dominant coniferous growing in this region and is used as bioindicators and archive of the environmental changes. The first investigations of pine needles have been carried out in two periods of time between 2012 and 2014 at sites 4,5,6 [26–27]. Between 2012 and 2014: one-year needles formed in 2012 were collected in January 2013 (sites: 4–6), five-month needles formed in 2013 were collected in September 2013 (sites: 4–6), and three-month needles formed in 2014 were collected in July 2014 (sites: 4–6).

In the current study, conducted in 2021, pines that grow in 15 sampling sites (sites 1–15) in the Silesia district were investigated. The time span covered by the analysis begins in 2019 and ends in 2021. The two-year-old needles formed since 2019 and the one-year-old needles formed since 2020 were collected in May 2021.

The investigated pines have grown at sampling sites located at different distances from factories, roads, and households.

A comparative site was located in Gliwice. The sampling at selected sampling sites was done on the same day to avoid weather influences.

Needles were collected from the crowns of 20-year-old Scots pine (*Pinus Sylvestris* L.), placed in plastic bags, and manually separated in the laboratory.

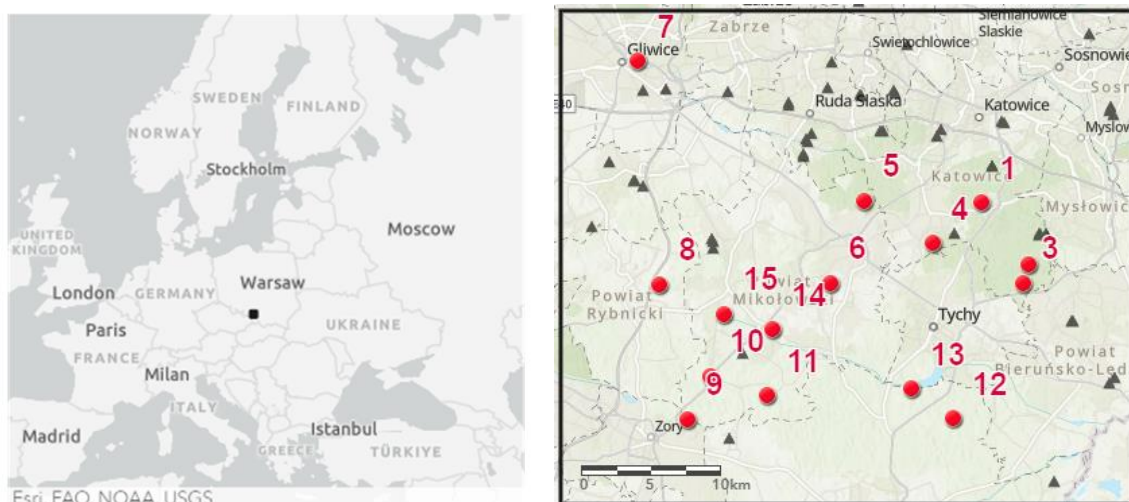


Fig. 1.1. Research area. Red dots indicate sampling sites, and black triangles indicate the localization of different factories in the investigated sites. Needles investigations were carried out over two periods of time (1) in 2012–2014 – sites 4,5,6 [26–27] and (2) in 2020–2021 (sites 1–15) [28]

Rys. 1.1. Obszar badawczy. Czerwone punkty wskazują miejsca pobierania prób, a czarne trójkąty lokalizację różnych fabryk w badanym obszarze. Badania igieł prowadzono w dwóch okresach (1) w latach 2012–2014 – stanowiska 4, 5, 6 [26–27] oraz (2) w latach 2020–2021 (stanowiska 1–15) [28]

The dried needles were extracted with the Soxhlet column using toluene (100°C, 4 h), ethanol (100°C, 4 h) and water (100°C, 4 h). The samples were then rinsed in hot water until neutralized and dried. α -cellulose was extracted applying standard procedures used in the Mass Spectrometry Laboratory of the Silesian University of Technology [12, 13, 22]. $\delta^{13}\text{C}$ was determined in the Silesian University of Technology mass spectrometry laboratory using a continuous flow isotope ratio mass spectrometer (Isoprime, GV Instruments, Manchester, UK) [26–30]. The standard deviation of the replication tests carried out with the use of international standards (C-3 and C-5, IAEA) was better than 0.2%. The relative deviation of the isotopic composition in the samples has been expressed in parts per thousand (‰, VPDB) as:

$$\delta = (R_{\text{sample}}/R_{\text{standard}} - 1) \cdot 1000, \quad (1.1)$$

1.2.1. Mass balance method

To conduct quantitative analysis and to estimate source attribution, the mass balance (MB) equation has been used [8, 9]:

$$1 = c_{\text{COal}} + c_{\text{traffic}}, \quad (1.2)$$

$$1 \cdot \delta^{13}\text{C}_{\text{bio}} = c_{\text{coal}} \cdot \delta^{13}\text{C}_{\text{coal}} + c_{\text{traffic}} \cdot \delta^{13}\text{C}_{\text{traffic}}, \quad (1.3)$$

where:

c_{coal} – fraction of the total carbon pool originating from coal combustion;

c_{traffic} – fraction of the total carbon pool originating from traffic emissions;

$\delta^{13}\text{C}(\text{bio, coal, traffic})$ – ^{13}C isotope signatures of coal burning and traffic-related fractions of the total carbon pool in the sample;

In southern Poland, the $\delta^{13}\text{C}$ in coal is $\sim -24\text{‰}$ [8,9] and in petroleum products is about -31‰ according to [8], in gasoline car it is about -31.7‰ , in a diesel car -31.9‰ and in the liquid petroleum gas car it is about -33.5‰ [9]. For analysis of combustion of coal from the origin fraction the following values were used in equations: $\delta^{13}\text{C}_{\text{coal}}$ equal to -24‰ , and as $\delta^{13}\text{C}_{\text{traffic}}$, the mean value (gasoline, diesel and petroleum [8, 9]): equal to -32.02‰ .

1.3. Results

The results of the composition of carbon isotopes in the needles collected in 2021 are presented in Figure 1.2 and Table 1.1. Figures 1.2–1.4 and Table 1.2 presents the comparison year to year, temporal and spatial similarities and differences in the fraction of the total carbon pool originating from traffic emissions and coal combustion. The data correspond to data of the beginning of needle formation (the “fresh” young needles that have grown since May 2012 were collected in January 2013, grown since May 2013 and collected in September 2013, grown since May 2014 and collected in July 2014, grown since May 2019 and collected in May 2021, and have grown since 2020 and collected in May 2021, respectively). The examined needles have been exposed to pollution from a few months to two years.

Table 1.1

Statistical analysis of variation of $\delta^{13}\text{C}$ in pine needles. Minimum (min), maximum (max) median, mean value, and standard deviation (SD)

	2012	2013	2014	2019	2020
	$\delta^{13}\text{C}$, ‰	$\delta^{13}\text{C}$, ‰	$\delta^{13}\text{C}$, ‰	$\delta^{13}\text{C}$, ‰	$\delta^{13}\text{C}$, ‰
min	-31.2	-31.1	-31.1	-27.5	-30.2
max	-28.5	-29.3	-27.9	-25.4	-27.0
median	-28.6	-30.9	-28.1	-26.2	-27.7
mean	-29.4	-30.4	-29.0	-26.3	-28.2
SD	1.2	0.8	1.5	0.5	1.1

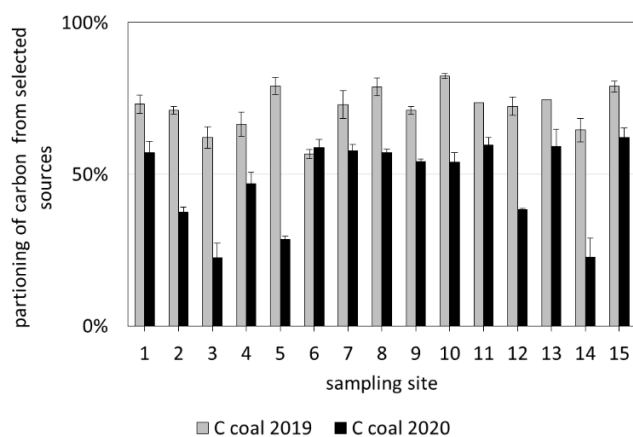
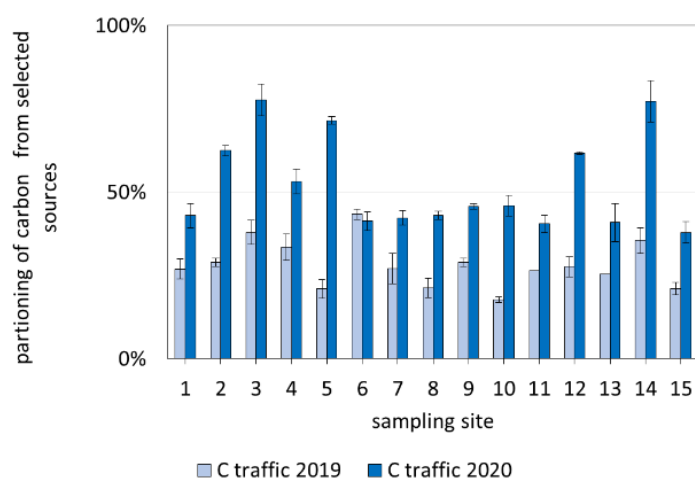


Fig. 1.2. Comparison year by year of the trend in the assignment of carbon from two sources (traffic (a) and coal combustion (b) in the total carbon pool in needles created in 2019 and 2020

Rys. 1.2. Porównanie rok do roku zmian udziału węgla pochodzącego z dwóch źródeł (ruch uliczny (a) i spalanie węgla (b) na podstawie analizy składu izotopowego igieł wykształconych w latach 2019 i 2020

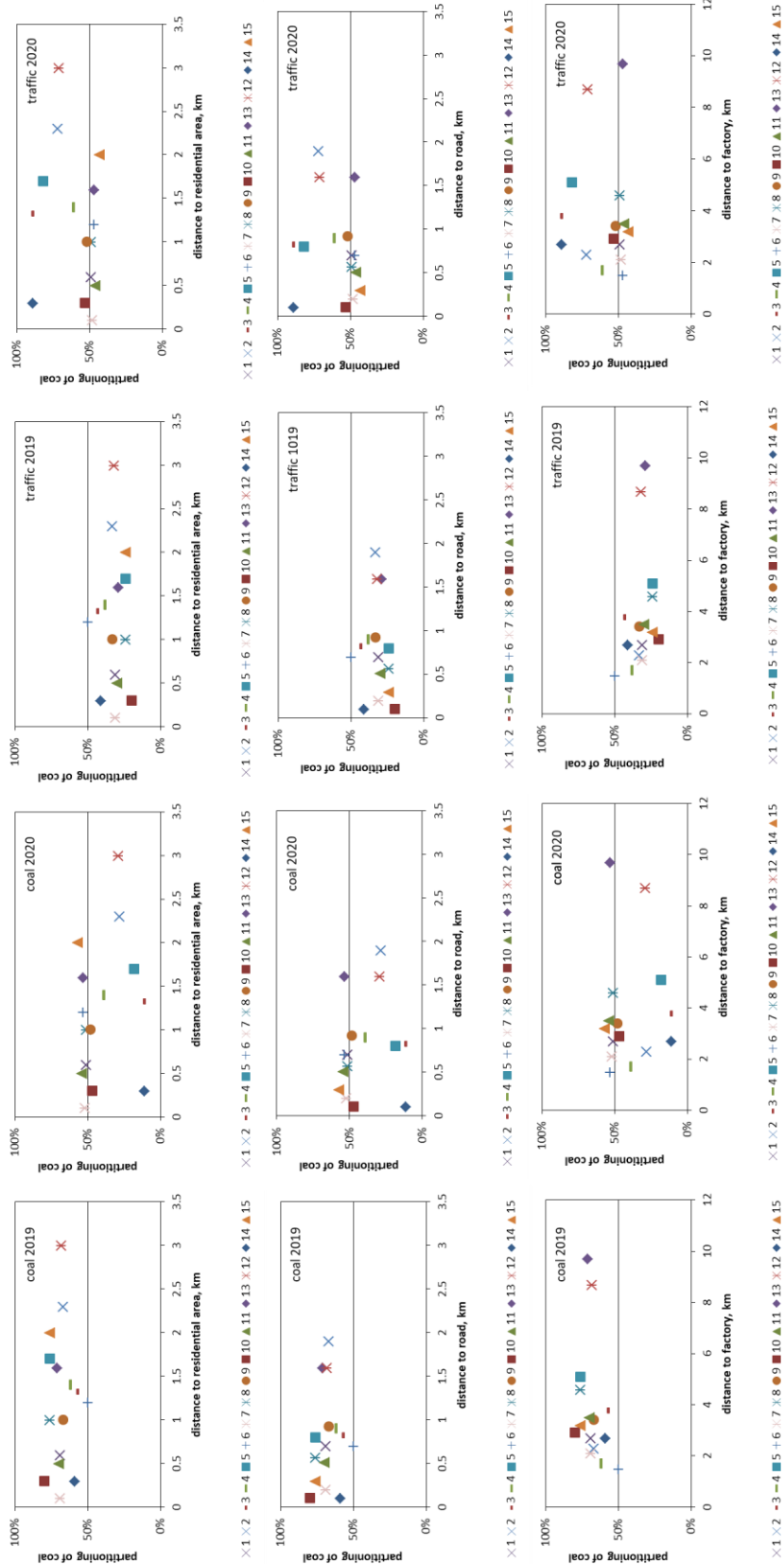


Fig. 1.3. Detailed spatial and temporal analysis of the portioning of carbon from different sources (traffic (a) and coal combustion (b)) in the total pool
 Rys. 1.3. Szczegółowa analiza przestrzenna i czasowa udziału węgla z różnych źródeł (ruch uliczny (a) i spalanie węgla (b))

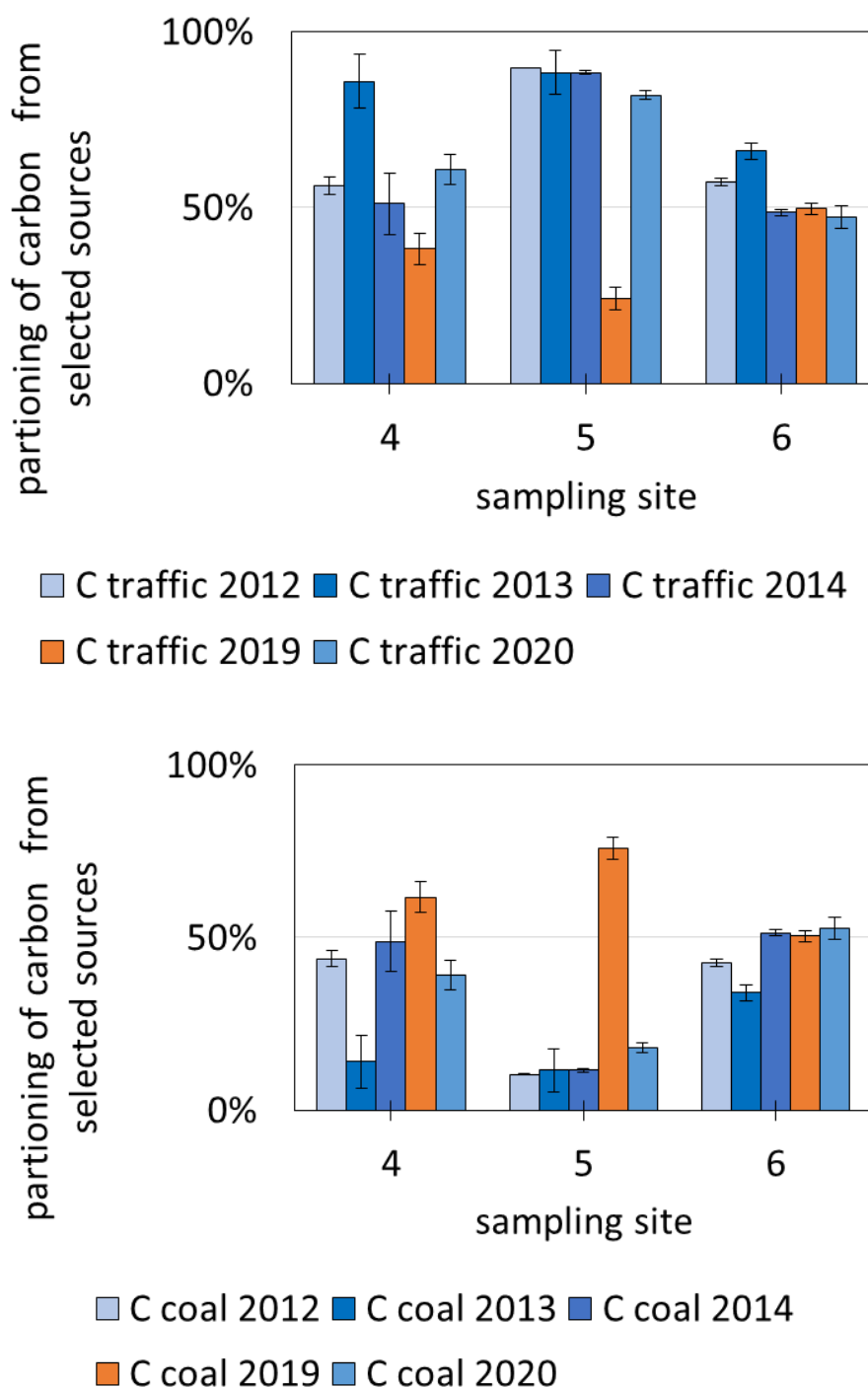


Fig. 1.4. Fraction of carbon origin from different sources (traffic (a) and coal combustion (b)), in needles growing since May 2012 and collected in January 2013, growing since May 2013 and collected in September 2013, growing since May 2014 and collected in July 2014, growing since May 2019 and collected in May 2021, and growing since 2020 and collected in May 2021, at sampling sites 4,5,6

Rys. 1.4. Frakcja węgla pochodzącego z różnych źródeł (ruch uliczny (a) i spalanie węgla (b)), w igłach rosnących od maja 2012 roku i zbieranych w styczniu 2013 roku, rosnących od maja 2013 roku i zbieranych we wrześniu 2013 roku, rosnących od maja 2014 roku i zbieranych w lipcu 2014 roku, rosnących od maja 2019 roku i zbieranych w maju 2021 roku oraz rosnących od 2020 roku i zbieranych w maju 2021 roku, w stanowiskach 4,5,6

Table 1.2

Statistical analysis (median, mean value and standard deviation, SD) of variation of the fraction of the total carbon pool in the needles from traffic and coal combustion

	2012		2013		2014		2019		2020	
	coal	traffic	coal	traffic	coal	traffic	coal	traffic	coal	traffic
median	43%	57%	14%	86%	49%	51%	69%	31%	48%	52%
mean	32%	68%	20%	80%	37%	63%	68%	32%	40%	60%
SD	16%	16%	10%	10%	18%	18%	8%	8%	16%	16%

1.4. Discussion

The higher concentration of CO₂ concentration affects $\delta^{13}\text{C}$. Changes in the composition of pine needle isotopes may be related to fossil fuel combustion and CO₂ mixing in the atmosphere and thus in the biosphere [1–22]. As far as the analysis of the origin of the carbon in total carbon pool, taking into account two sources – traffic (combustion of petroleum, gasoline and diesel) and coal combustion (mostly for heating and cooking, but also used in the industrial sector). The result of 'blending' carbon isotopes from different sources as a result of this “mix” is the depletion of $\delta^{13}\text{C}$ in atmospheric CO₂ and the biosphere. An exposure to elevated CO₂ has an effect on needle [9, 23, 24, 31, 32]. The stomata co-regulate the influx of CO₂ for photosynthesis and the transpirational loss of water to the atmosphere. According to, growing CO₂ may positively influence $\delta^{13}\text{C}$ in C3 species, and this effect can also be reflected in the attribution of carbon to the total pool.

Spatial and temporal differences in the fraction of the total carbon pool in the needles from traffic and coal combustion, and thus in stable isotope composition of pine needles, are evident.

In needles that start growing in 2019 and 2020, $\delta^{13}\text{C}$ fluctuated between -27.5‰ and -25.4‰ in 2019, and between -27‰ and -30.2‰ in needles created in 2020, respectively.

Performing temporal analysis, it has been observed that in pine growing at sites 4,5 and 6 that $\delta^{13}\text{C}$ fluctuated between -31.2 ‰ and -28.5‰ in the needles formed in 2012, between -31.1‰ and -29.3‰ in the needles formed in 2013 and between -31.1 ‰ and -27.9‰, in the needles formed in 2014. There are no significant year-to-year differences in the pine growth at sites 4 and 5. Then, in 2019, $\delta^{13}\text{C}$ is significantly less negative. Analysis of the fraction of the total carbon pool in needles created in 2019 and 2020 originating from traffic emissions and coal combustion indicates significant

changes and more than 50% of the carbon origin from coal combustion. The relatively low fraction of traffic in the total pool may be due to a limitation in road traffic due to restriction during the COVID pandemic. In the needles formed in 2020, in two of those sites, $\delta^{13}\text{C}$ reached similar value as in 2012–2014.

Also, comparing data between 2019 and 2020 in other sites, the variation in the amount ratio of carbon origin from traffic and coal combustion can vary due to the reduction and limitation of mobility due to COVID restriction in 2019, but also due to changes in the energetic sector in Silesia. Significant numbers of the households have been obligated to modify and/or change the sources of energy and, in consequence, the use of carbon in cooking and heating the households has been limited. That is why a lower partitioning in carbon origin from coal combustion has been observed and a more significant impact of contaminations from traffic is visible in the needles created in 2020.

The analysis of $\delta^{13}\text{C}$ in pine needles created in 2020 has shown that less negative $\delta^{13}\text{C}$ ($\sim -27\text{‰}$) values have been observed in pines growing near the edge of forests and near the residential area, and it corresponds to the use of mainly coal by householders (sites: 1, 6–11, 13, 15). At these sampling sites, the partitioning of the coal combustion is above 50%. The distance between these sampling sites and the nearest residential area is less than 1.5 km.

The most negative $\delta^{13}\text{C}$ ($\sim -30\text{‰}$) values was observed in sites (3, 5, 14) located close to the edge of the forests and close to the road (less than 1 km) and further from the residential area (1.5 to 2.5 km), where the impact of traffic has also been significant, and the attribution of the source of the coal from traffic is above 70%.

Although the sampling site in Gliwice (7) was very close to the street, the effect of burning gasoline by cars has not been observed in $\delta^{13}\text{C}$ nor in traffic in trees growing there. It can be associated with the fact that pines grow behind sound screens, which can be an important barrier not only for noise but also for the distribution of contamination emitted by traffic.

Carbon dioxide has been observed to originate from different sources. However, in one site at the same distance from the nearest road and residential area as in another site, this site was closer to the nearest industrial factory. In the investigated area, we cannot observe a direct link nor between $\delta^{13}\text{C}$, and nor between c traffic and c coal in pines and the distance from the factories to the sampling stands. This may be due to the fact that most industrial factories have implemented a pro-ecological policy since the 1990s.

Detailed spatial analysis has shown that the variation in attribution of carbon from different sources in pines may be related to other human activities such as heating and cooking (coal combustion) and road traffic (petroleum and gas combustion).

In 2020, $\delta^{13}\text{C}$ in pine growing in the sampling sites (2, 4, 12) located deep in the forest was equal to -29‰, and the carbon partition of coal and traffic was nearly the same for both. This value may probably be the result of the “blending” of carbon isotopes that originate from different sources. At this time, another hypothesis cannot be excluded that these sampling sites are too far from potential local emitters, to record connected householders and traffic, and these values could be associated with long-range transport of air contamination and C level in the atmosphere, which have been already confirmed by scientists, why made analysis of carbon isotopes in the needles.

1.5. Conclusions

Trees can be used for environmental biomonitoring. Changes in the carbon isotopes of pine needles can occur due to the mixture of CO_2 from air from various sources associated with different human activities. The impact of local effects and local air contaminations is evident. Analysis of the stable isotope composition and thus origin of carbon in the biosphere using mass balance method shows the fluctuation in carbon isotopic composition resulting from gasoline combustion and coal combustion. Further additional analyzes in this region are required due to the dynamic change in the energy sector in Poland; such an analysis can be crucial to understand the impact of CO_2 emission on the environment and the consequences of limitation of the emission of anthropogenic CO_2 .

Funding

A part of the research was supported by National Science Center, Poland [grant number DEC-2011/03/D/ST10/05251]. The sampling was done within the Project-Based Learning “Applied Physics and ArcGIS technology in the Environmental Research: Air pollutants deposition on the foliage – a case study of biomonitoring of the industrial area (acronym: DEPON)” (PI Barbara Sensuła, Team Leader: Agnieszka Sasiela) and “Applied Physics and ArcGIS technology in the Environmental Research- Air pollutants accumulation the foliage – a case study of biomonitoring of the industrial area (ACCUM)” (PI: Barbara Sensuła, Team Leader: Dawid Lazaj).

Acknowledgments

The authors express their sincere gratitude to everyone who contributed to this study, particularly the students and staff and of the Silesian University of Technology.

Bibliography

1. NOAA. Global Monitoring Laboratory – Carbon Cycle Greenhouse Gases (noaa.gov), <https://gml.noaa.gov/ccgg/> date of access 28/12/2022.
2. Boden T.A., Marland G., Andres R.J.: Global Regional and National Fossil-Fuel CO₂ Emissions. Carbon Dioxide Information Analysis Center Oak Ridge National Laboratory U.S. Department of Energy Oak Ridge Tenn, U.S.A. 2016. DOI: 10.3334/CDIAC/00001_V2016.
3. Keeling C.D., Chin J.F.S., Whorf T.P.: Increased activity of northern vegetation inferred from atmospheric CO₂ measurements. *Nature* 1996, 382, 146–149.
4. Baydoun R., Samad, O., Nsouli, B., Youness G.: Seasonal variations of radiocarbon content in plant leaves in a 14C depleted area. *Radiocarbon* 2015, 57(3), 389–395.
5. Levin I., Naegler T., Kromer E., Diehl M., Francey R., Gomez-Pelaez A., Schäfer A., Steele L.P., Wagenbach D., Weller R., Worthy D.E.: Observations and Modeling of the Global Distribution and Long-Term Trend of Atmospheric 14CO₂. *Tellus*, 2010, 62B: 26.
6. Craig H.: Carbon-13 in plants and the relationship between carbon-13 and carbon-14 variations in nature. *J. Geol.* 1954, 62, 115–149.
7. Kuc T., Rozanski K., Zimnoch M., Necki J., Chmura L., Jelen D.: Two decades of regular observations of 14CO₂ and 13CO₂ content in atmospheric carbon dioxide in central Europe: Long term changes of regional anthropogenic Fossil CO₂ emissions. *Radiocarbon* 2007, 49(2), 807–816.
8. Zimnoch M., Jelen D., Galkowski M., Kuc T., Necki J., Chmura L., Gorczyca Z., Jasek A., Róžański K.: Partitioning of atmospheric carbon dioxide over central Europe: composition. *Isotopes in Environmental and Health Studies* 2012, 48(3), 421–433.
9. Górka M., Sauer P.E., Lewicka-Szczepak D., Jędrysek M.O.: Carbon isotope signature of dissolved inorganic carbon (DIC) in precipitation and atmospheric CO₂. *Environmental pollution* 2011, 159, 1, 294–301.
10. Ehrelinger J.R., Hall A.E., Farquhar G.D.: *Stable Isotopes and Plant Carbon-Water Relation*, 1st ed.; Academic Press: New York, NY, USA 1993, 1–555.
11. Jasek-Kamińska A., Zimnoch M., Wachniew P., Róžański K.: Urban CO₂ Budget: Spatial and Seasonal Variability of CO₂ Emissions in Krakow, Poland. *Atmosphere* 2020, 11, 629. <https://doi.org/10.3390/atmos11060629>.
12. Green J.: Wood cellulose. In *Methods in Carbohydrate Chemistry* 3; Whistler, R.L., Ed.; Academic Press: New York, NY, USA 1963, 9–21.
13. Pazdur A., Kuc T., Pawelczyk S., Piotrowska N., Sensuła B., Rozanski K.: Carbon Isotope Composition of Atmospheric Carbon Dioxide in Southern Poland: Imprint of Anthropogenic CO₂ Emissions in Regional Biosphere. *Radiocarbon* 2013, 55(2), 848–864.

14. McCarroll D., Gagen M.H., Loader N.J., Robertson I., Anchukaitis K.J., Los S., Young G.H.F., Jalkanen R., Kirchhefer A., Waterhouse J.S.: Correction of tree ring stable carbon isotope chronologies for changes in the carbon dioxide content of the atmosphere. *Geochim. Cosmochim. Acta* 2009, 73, 1539–1547.
15. Savard M.M.: Tree-ring stable isotopes and historical perspectives on pollution: An overview. *Environ. Pollut.* 2010, 158, 2007–2013.
16. Ferrio J., Voltas J., Araus J.: Use of carbon isotope composition in monitoring environmental changes. *Manag. Environ. Qual.* 2003, 14, 82–98.
17. Giovanni L., Battipaglia G., Siegwolf R.T.W., Saurer M., CMorra di Cella U., Cherubini P., Pelfini M.: Climatic isotope signals in tree rings masked by air pollution: A case study conducted along the Mont Blanc Tunnel access road (Western Alps Italy). *Atmos. Environ.* 2012, 61, 169–179.
18. Hammer S., Levin I.: Monthly mean atmospheric $^{14}\text{CO}_2$ at Jungfraujoch and Schauinsland from 1986 to 2016 [Data set]. University Library Heidelberg, 2017. <https://doi.org/10.11588/data/10100>.
19. Siegwolf R.T.W., Brooks J.R., Roden J., Saurer M.: *Stable Isotopes in Tree Rings Inferring Physiological, Climatic and Environmental Responses*, 1st ed. 2022 Ed.; Springer Nature, Switzerland, 773.
20. Choi W.J., Lee K.H.: A short overview on linking annual tree ring carbon isotopes to historical changes in atmospheric environment. *Forest Science and Technology* 2012 8(2), 61–66.
21. Leavitt S., Long A.: Stable carbon isotopes as a potential supplemental tool in dendrochronology. *Tree Ring Bull.* 1982, 42, 49–56.
22. Green J.: Wood cellulose. In *Methods in Carbohydrate Chemistry 3*; Whistler, R.L., Ed.; Academic Press: New York, NY, USA 1963, 9–21.
23. Białobok S.: *Outline of Physiology of Scots Pine (Zarys Fizjologii Sosny Zwyczajnej)*, 1st ed.; SORUS: Poland Kórnik 1976, 1–613.
24. Barszczowska L., Jędrysek M.O.: Carbon Isotope distribution along Pine needles (*Pinus Nigra* Arnold). *Acta Societatis Botanicorum Poloniae* 2005, 74, 93–98.
25. Farquhar G.D., Lloyd L.: Carbon and oxygen isotope effects in the exchange of carbon dioxide between plants and the atmosphere. In *Stable Isotopes and Plant Carbon-Water Relations*; Ehrelinger, J.R., Hall, A.E., Farquhar, G.D., Eds.; Academic Press: New York, NY, USA 1993, 47–70.
26. Sensuła B., Wilczyński S., Opała M.: Tree growth and climate relationship: Dynamics of scots pine (*Pinus sylvestris* L.) growing in the near-source region of the combined heat and power plant during the development of the pro-ecological strategy in Poland. *Water Air Soil Pollut.* 2015, 226, 220.
27. Sensuła B., Michczyński A., Piotrowska N., Wilczyński S.: Anthropogenic CO_2 Emission Records in Scots Pine Growing in the Most Industrialized Region of Poland from 1975 to 2014. *Radiocarbon* 2018, 60, 1041–1053.
28. Sensuła B., Piotrowska N., Nowińska K., Koruszowic M., Lazaj D., Osadnik R., Paluch R., Stasiak A., Strączek B.: Characteristics of pine needles exposed to pollution in Silesia, Poland: carbon isotopes, $\delta^{13}\text{C}$, and trace element concentrations in pine needles. *Radiocarbon* 2023 (accepted in press).
29. Sensuła B., Fagel N., Michczyński A.: Radiocarbon, trace elements and Pb isotope composition of pine needles from a highly industrialized region in southern Poland. *Radiocarbon*, 2021, 63(2), 713–726. DOI:10.1017/RDC.2020.132.

30. Sensuła B., Toroń B., Roczniak J., Sasiela A., Świątkowski J., Tomaszowska A.: Characteristics of pine needles exposed to multi-source pollution in Silesia: radiocarbon concentration in pine needles and elemental analysis of the needles' surface deposits. *Radiocarbon*, 2022, 1–12. DOI:10.1017/RDC.2022.85.
31. Lin J., Jach M.E., Ceulemans R.: Stomatal density and needle anatomy of Scots pine (*Pinus sylvestris*) are affected by elevated CO₂. *New Phytologist*, 2001, 150, 665–674. <https://doi.org/10.1046/j.1469-8137.2001.00124.x>.
32. Brendel O., Handley L., Griffiths H.: The $\delta^{13}\text{C}$ of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) needles: spatial and temporal variations. *Annals of Forest Science*, 2003, 60 (2), 97–104.
33. Asseng S., Ewert F., Martre P., Rötter R.P., Lobell D.B., Cammarano D., Kimball B.A., Ottman M.J., Wall G.W., White J.W., et al.: Rising temperatures reduce global wheat production. *Nature Climate Change*, 2015, 5, 143–147. DOI:10.1038/nclimate2470.

2. ANALIZA PRZESTRZENNA ZANIECZYSZCZEŃ POWIETRZA NA OBSZARZE KAMPUSU POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ

2.1. Wprowadzenie

Liczne badania toksykologiczne i epidemiologiczne coraz częściej potwierdzają związki zachodzące pomiędzy zanieczyszczeniem powietrza atmosferycznego a negatywnymi skutkami zdrowotnymi [1, 2]. Zgodnie z raportem Światowej Organizacji Zdrowia [3] dziewięć na dziesięć osób oddycha zanieczyszczonym powietrzem i co roku powoduje to około siedem milionów zgonów na całym świecie. Wysoki poziom zanieczyszczenia powietrza pyłem PM_{10} i $PM_{2,5}$ oraz gazowymi zanieczyszczeniami, takimi jak m.in. CO, O_3 i NO_2 w miastach na całym świecie, pogoda, a także specyficzne warunki klimatyczne mają znaczący wpływ na wzrost zachorowań na COVID-19 i na większą liczbę zgonów [4, 5]. Większość badań skupia się obecnie na frakcji respirabilnej $PM_{2,5}$, która uważana jest za najbardziej szkodliwą, bo podczas wdychania drobne cząstki pyłu mogą przenikać głęboko do płuc wraz z obecnymi w nich lub zaadsorbowanymi na ich powierzchni związkami organicznymi i nieorganicznymi [6].

Polska jest jednym z krajów, w którym standardy jakości powietrza są przekraczane na dominującym obszarze i zajmuje od wielu lat – według Europejskiej Agencji Środowiska – jedno z pierwszych miejsc w klasyfikacji państw o najbardziej zanieczyszczonym powietrzu w Europie. Na znacznym obszarze Polski istotnym problemem są frakcje pyłu zawieszzonego PM_{10} i $PM_{2,5}$, benzo(a)piren, a także gazowe zanieczyszczenia, takie jak tlenki azotu (NO_x). Na przekraczanie norm jakości powietrza dla pyłów PM_{10} i $PM_{2,5}$ ma wpływ nie tylko ich emisja, ale również ich gazowych prekursorów powszechnie emitowanych do atmosfery (głównie SO_2 , NO_x i węglowodorów). Należy liczyć się z tym, że zmiany prawne w odniesieniu do norm emisji zanieczyszczeń skutkować będą dalszą redukcją emisji, głównie w odniesieniu do zanieczyszczeń gazowych, zwłaszcza ditlenku siarki i tlenków azotu oraz zanieczyszczeń pyłowych. Za obecny stan jakości powietrza w Polsce i w wielu państwach Unii Europejskiej odpowiedzialna jest głównie tzw. niska emisja

pochodząca z sektora bytowo-komunalnego, skupiająca indywidualne źródła wytwarzania ciepła i małe ciepłownie komunalne oraz niewielkie zakłady usługowe, a także emisja z transportu samochodowego [7]. Dominującym źródłem emisji jest także nadal przemysł energetyczny i ciepłowniczy. Czynniki negatywnie wpływającymi na stan jakości powietrza, zwłaszcza w przypadku niskich źródeł emisji, są niekorzystne warunki meteorologiczne takie jak: stany bezwietrzne, niska temperatura czy mgła. Duże prędkości wiatru oraz intensywne opady skutkują znacznym spadkiem poziomu stężeń zanieczyszczeń. W powszechnej opinii jako główną przyczynę złej jakości powietrza w Polsce uznaje się wykorzystanie węgla. Mimo znacznego rozwoju systemów grzewczych, bazujących na odnawialnych źródłach energii, to biorąc pod uwagę wielkość zasobów węgla kamiennego i brunatnego oraz bezpieczeństwo energetyczne, można przypuszczać, że węgiel będzie nadal podstawowym paliwem w energetyce przemysłowej i komunalnej oraz w gospodarstwach domowych. Procesy energetycznego spalania paliw generują od 55% do 80% całkowitej emisji pyłów. Elektrownie węglowe stanowią znaczące źródło emisji większości niebezpiecznych substancji, w tym biodostępnych form pierwiastków m.in.: As, Cd, Cr i Ni [8]. Problem ten nie dotyczy jedynie Polski, ale również innych krajów, w których polityka energetyczna oparta jest na węglu, i będzie się on potęgował, zwłaszcza w okresie zimowym, kiedy dodatkowy wpływ będzie wykazywała tzw. niska emisja.

Od IV kwartału 2018 roku Politechnika Śląska ma, zbudowane na podwoziu samochodu Ford Transit, mobilne laboratorium, a uzyskane wyniki pomiarów mają zastosowanie w obszarze prognozowania niskiej emisji oraz mogą służyć jako narzędzie do walki ze smogiem. Wyposażenie mobilnego laboratorium emisji zanieczyszczeń powietrza stanowi: analizator SO_2 -T100/Teledyne API, analizator NO_x -T200/Teledyne API, analizator O_3 -T400/Teledyne API, miernik pyłu zawieszzonego $\text{PM}_{10}/\text{PM}_{2,5}$ BAM1020, zestaw meteo WS500 Lufft, czerpnia Envimet Services, system kalibracyjny Envimet Services, dataloger z wyświetlaczem Envimet Services, co pozwala na prowadzenie pomiarów ww. substancji zgodnie z obowiązującymi normami [9–12].

2.2. Lokalizacja punktu pomiarowego

W ramach artykułu wykorzystane zostały wyniki pomiarów dokonanych w 2020 roku na terenie kampusu Politechniki Śląskiej. Punkt poboru PP (Gliwice,

ul. Konarskiego 20B) o współrzędnych 50.292934N, 18.682164E. Zlokalizowany zgodnie z [13], znajduje się w sąsiedztwie ciągów komunikacyjnych od strony północno-wschodniej w odległości około 500 m przebiega droga DW902, w kierunku północno-zachodnim w odległości około 450 m – droga DW901, a w kierunku zachodnim w odległości około 600 m – droga DK78. Ponadto w kierunku północnym, w odległości około 600 m znajduje się rozwinięta infrastruktura kolejowa (stacja kolejowa Gliwice). Istotne jest także i to, że w bezpośrednim sąsiedztwie PP znajduje się typowa zabudowa miejska obejmująca budynki użyteczności publicznej, centrum handlowe oraz budynki mieszkalne w zabudowie wielorodzinnej. Część budynków w pobliżu punktu pomiarowego podłączona jest do systemu ciepłowniczego, zlokalizowanego na obrzeżach miasta, w odległości około 2 km w kierunku wschodnim od PP.

W otoczeniu punktu poboru znajdują się ponadto duże zakłady przemysłowe, tj. 5 hut, 29 odlewni żeliwa oraz 3 elektrownie węglowe [14].

2.3. Procedura Czekanowskiego – istota metody

Procedura Czekanowskiego (diagram Czekanowskiego), będąca najstarszą numeryczną metodą taksonomiczną [15, 16, 17], zaliczana jest do działu analizy skupień/grupowana danych. Metoda ta znajduje zastosowanie zwłaszcza wtedy, gdy skomplikowane zależności między obiektami w serii uniemożliwiają skuteczne wykorzystanie hierarchicznych metod grupowania. W metodzie tej punktem wyjścia jest symetryczna, kwadratowa macierz odległości D między badanymi obiektami r i s [15, 16, 17]. Postępowanie w metodzie Czekanowskiego polega na przestawianiu wierszy i odpowiadających im kolumn w macierzy D w taki sposób, aby wzdłuż przekątnej macierzy znajdowały się jak najmniejsze elementy i aby wraz z oddaleniem od przekątnej wartości mierników odległości były coraz większe. Wszystkie mierniki odległości dzielone są na kilka klas, a następnie poszczególnym klasom przyporządkowuje się symbole graficzne, co pozwala na wzrokową ocenę dobroci uporządkowania macierzy D . W efektem stosowania metody Czekanowskiego jest [15, 16] uporządkowana macierz odległości obiektów, co z kolei umożliwia określenie tzw. skupisk obiektów (obiektów znajdujących się blisko siebie w przestrzeni wielowymiarowej).

2.4. Omówienie wyników badań

Pomiary stężenia pyłów PM_{10} [$\mu\text{g}/\text{m}^3$] i $PM_{2,5}$ [$\mu\text{g}/\text{m}^3$] oraz stężenia SO_2 [$\mu\text{g}/\text{m}^3$], NO [$\mu\text{g}/\text{m}^3$], NO_x [$\mu\text{g}/\text{m}^3$] i O_3 [$\mu\text{g}/\text{m}^3$] w powietrzu zewnętrznym dla całego 2020 roku dotyczyły tylko jednego punktu pomiarowego ($r=s$), dlatego też w celu określenia „obiektów” wprowadzony został dodatkowy parametr (cecha) – czas (momenty czasowe) dokonywania pomiarów (pobierania próbek). Porównywane były zatem „obiekty” opisywane przez ww. cechy w kolejnych tygodniach 2020 roku (z uwagi na ograniczenia programu MaCzek v. 3.0 (liczba obiektów poddanych analizie) do obliczeń przyjęte zostały średnie wartości stężeń ww. parametrów w ramach kolejnych tygodni). Wyniki pomiarów rozdzielono na dwa okresy:

- tzw. zimowy, tj. od 1.01.2020 roku do 31.03.2020 roku oraz od 01.10.2020 roku do 31.12.2020 roku;
- tzw. letni: od 01.04.2020 roku do 30.09.2020 roku.

Zestawienie wartości pomiarowych PM_{10} [$\mu\text{g}/\text{m}^3$], $PM_{2,5}$ [$\mu\text{g}/\text{m}^3$], SO_2 [$\mu\text{g}/\text{m}^3$], NO [$\mu\text{g}/\text{m}^3$], NO_x [$\mu\text{g}/\text{m}^3$] i O_3 [$\mu\text{g}/\text{m}^3$] przedstawia tabela 2.1.

Tabela 2.1

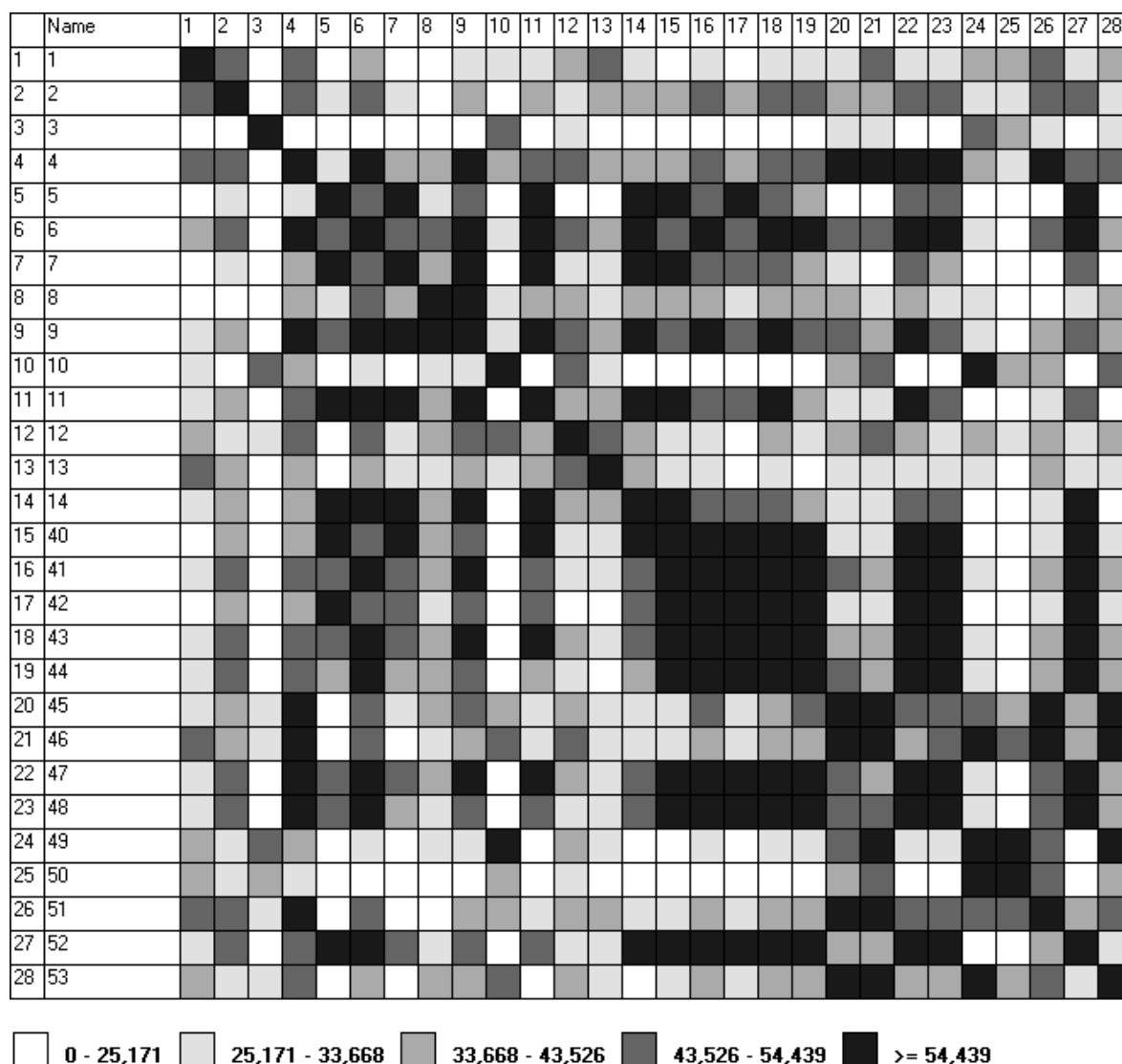
Zestawienie (średnich wartości tygodniowych) stężenia PM_{10} [$\mu\text{g}/\text{m}^3$] i $PM_{2,5}$ [$\mu\text{g}/\text{m}^3$] oraz zawartości SO_2 [$\mu\text{g}/\text{m}^3$], NO [$\mu\text{g}/\text{m}^3$], NO_x [$\mu\text{g}/\text{m}^3$] i O_3 [$\mu\text{g}/\text{m}^3$] w 2020 roku

Okres zimowy							
Name	Tydzień	VAR 1	VAR 2	VAR 3	VAR 4	VAR 5	VAR 6
1	01. 01. – 05. 01.	64,390	45,073	29,835	15,401	37,424	36,546
2	06. 01. – 12. 01.	49,153	34,407	29,504	6,817	24,264	29,971
3	13. 01. – 19. 01.	71,740	50,218	20,168	36,984	84,033	24,239
4	20. 01. – 26. 01.	46,030	32,221	7,789	9,709	40,865	32,143
...
14*	30. 03. – 31. 03.	30,202	21,141	7,672	4,814	25,144	55,992
40**	01. 10. – 04. 10.	20,672	14,470	21,566	7,504	27,287	39,777
41	05. 10. – 11. 10.	24,817	17,372	21,578	11,411	36,492	30,339
42	12. 10. – 18. 10.	18,573	13,001	21,420	6,437	24,896	31,301
...
50	07. 12. – 13. 12.	71,705	50,193	23,182	20,706	57,192	8,458
51	14. 12. – 20. 12.	53,828	37,680	16,560	13,224	41,706	18,528
52	21. 12. – 27. 12.	30,255	21,179	16,119	6,504	24,213	33,171
53	28. 12. – 31. 12.	41,457	29,020	23,863	21,613	64,024	21,507

Okres letni							
Name	Tydzień	VAR 1	VAR 2	VAR 3	VAR 4	VAR 5	VAR 6
14	01. 04. – 05. 04.	44,333	31,033	10,803	7,275	30,907	69,658
15	06. 04. – 12. 04.	54,560	38,192	10,061	16,706	50,848	69,333
16	13. 04. – 19. 04.	30,405	21,284	8,466	10,930	36,456	69,469
17	20. 04. – 26. 04.	42,650	29,855	9,710	14,013	45,151	68,260
...
37	07. 09. – 13. 09.	25,032	17,552	19,114	20,145	51,944	42,791
38	14. 09. – 20. 09.	32,529	22,770	19,650	21,463	58,542	39,513
39	21. 09. – 27. 09.	29,723	20,806	20,475	13,824	46,119	36,864
40	28. 09. – 30. 09.	23,538	16,477	22,124	13,972	43,441	19,255

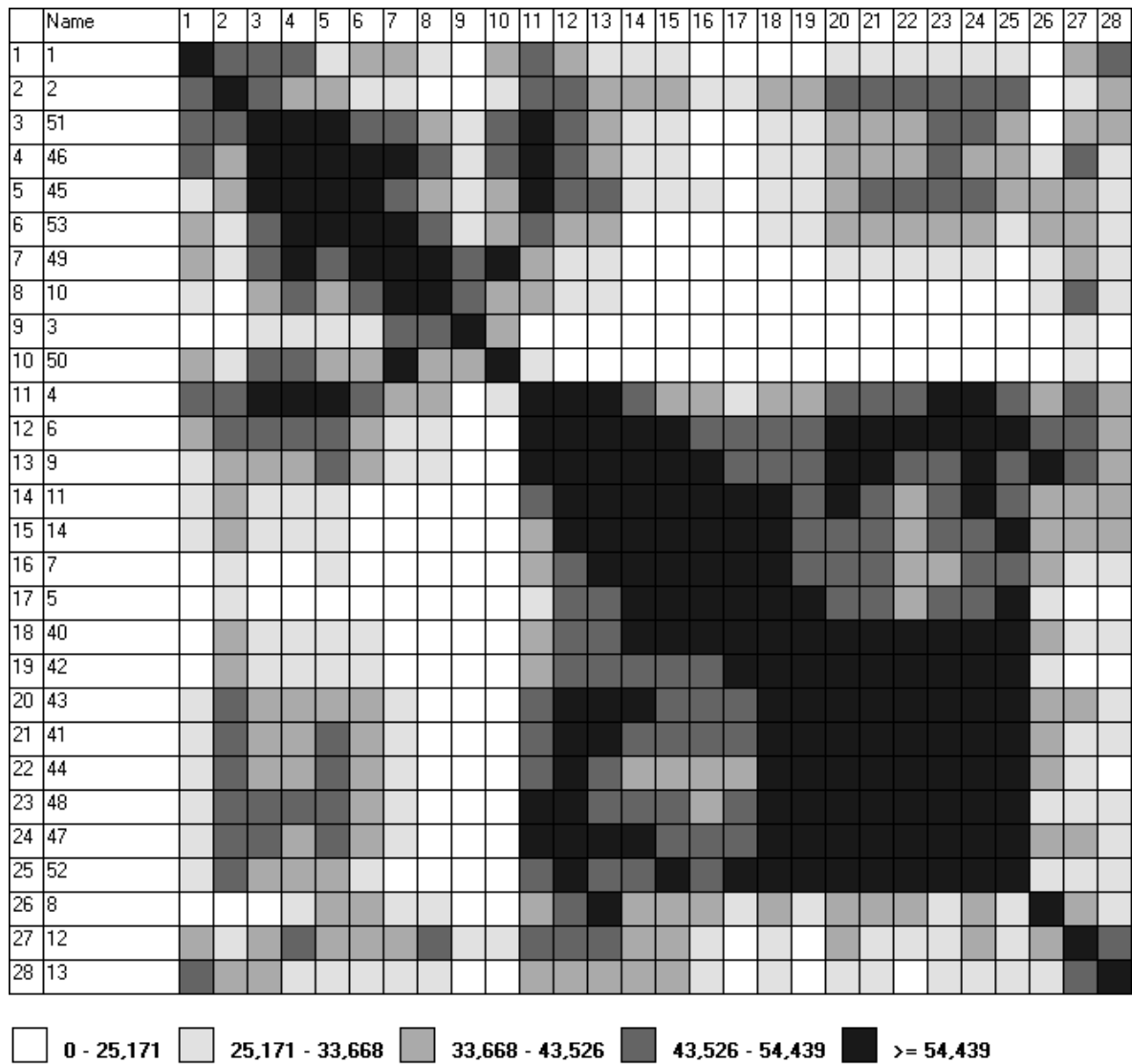
gdzie: name – nr tygodnia w 2020 roku; VAR 1 – stężenie PM₁₀ [µg/m³]; VAR 2 – stężenie PM_{2,5} [µg/m³]; VAR 3 – stężenie SO₂ [µg/m³]; VAR 4 – stężenie NO [µg/m³]; VAR 5 – stężenie NO_x [µg/m³]; VAR 6 – stężenie O₃ [µg/m³]; *, ** – tygodnie nr 14. i 40. występuje w zestawieniu za okres zimowy i letni, co wynika z przyjętych dat rozpoczęcia/zakończenia okresów zimowego i letniego.

Wykorzystując program MaCzek v. 3.0 [18] (aplikacja pracująca w systemie Windows 95 i nowsze, która oprócz tworzenia diagramów Czekanowskiego pozwala m.in. na standaryzację danych oraz na wyznaczanie odległości pomiędzy obiektami; maksymalna wielkość diagramu to 250 obiektów oraz 100 cech opisujących obiekt), wyznaczone zostały odległości Euklidesa pomiędzy „obiettami”, a następnie przeprowadzono uporządkowanie diagramu według algorytmu polegającego na dobieraniu obiektów najbardziej do siebie podobnych (rys. 2.1–2.4). Dla obu okresów (zimowego i letniego) zdefiniowanych zostało pięć przedziałów podobieństw (I–V): od grup bardzo podobnych (odległości 0–25,171 w przypadku okresu zimowego i 0–14,489 w przypadku okresu letniego) do grup bardzo niepodobnych (odległości >54,439 w przypadku okresu zimowego i >40,904 w przypadku okresu letniego).



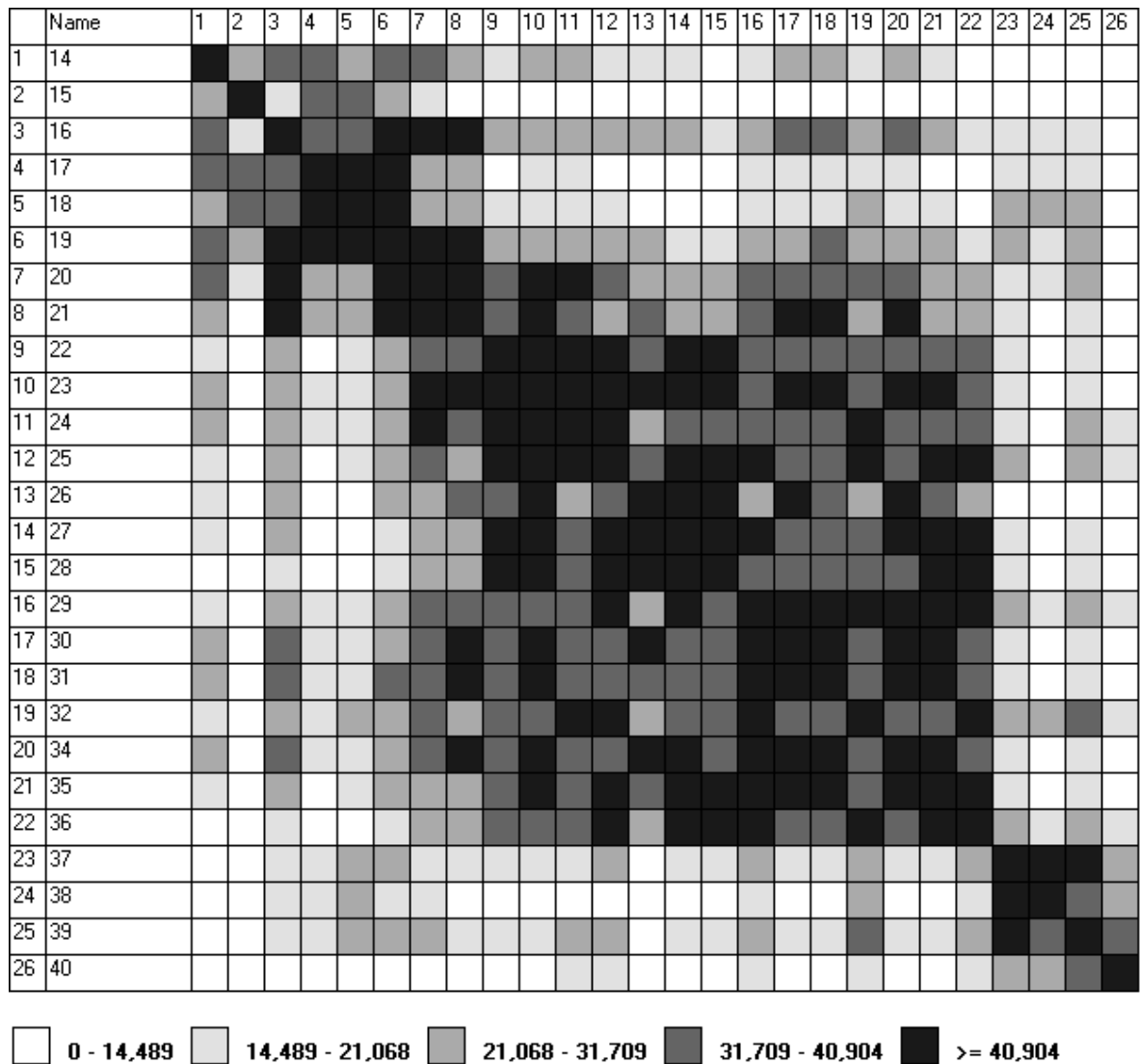
Rys. 2.1. Diagram Czekanowskiego – okres zimowy przed uporządkowaniem „obiektów”. Źródło: opracowanie własne

Fig. 2.1. Czekanowski's diagram – the winter period before organizing “objects”. Source: own elaboration



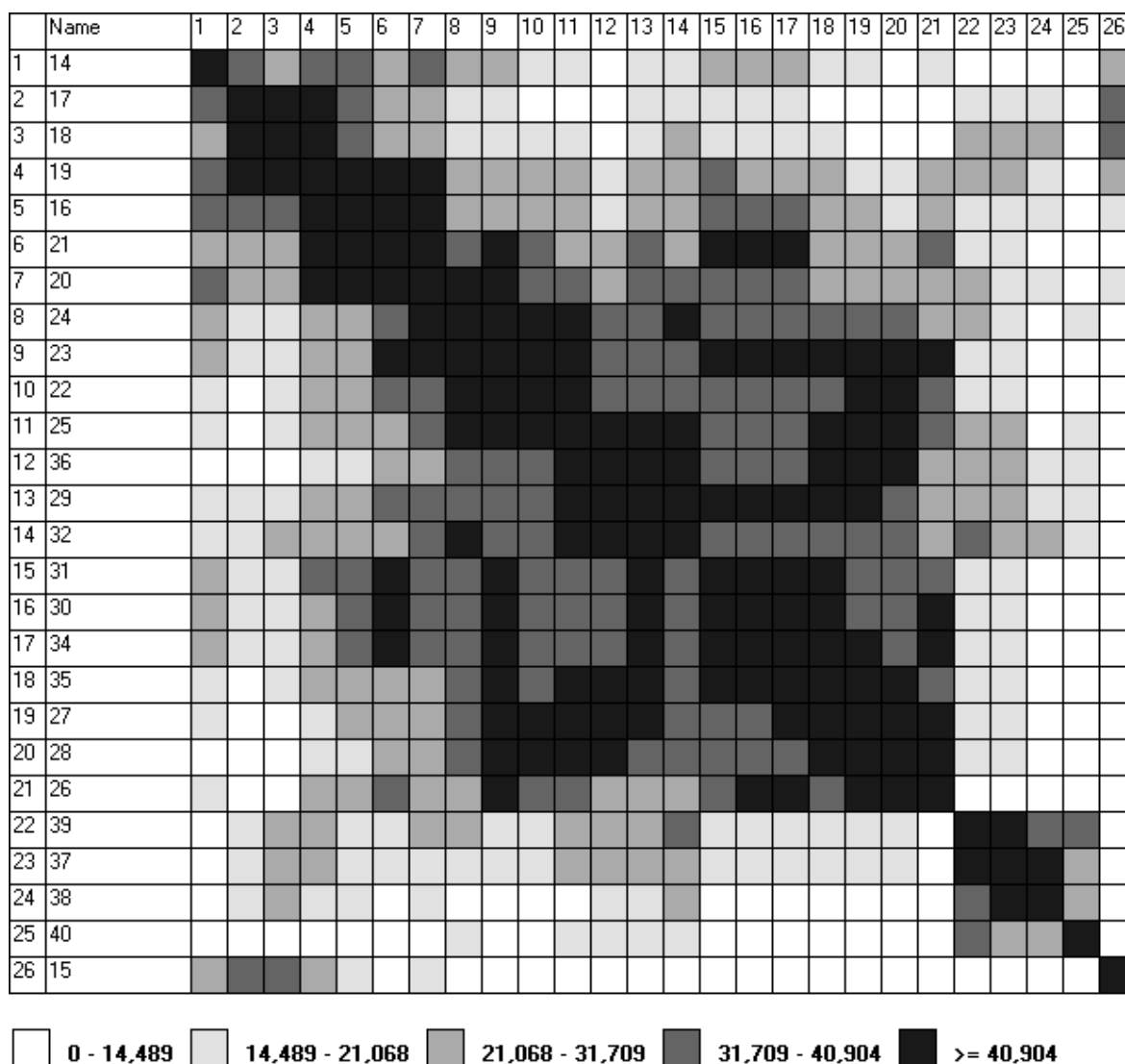
Rys. 2.2. Diagram Czekanowskiego – okres zimowy po uporządkowaniu „objektów”. Źródło: opracowanie własne.

Fig. 2.2. Czekanowski's diagram – the winter period after organizing “objects”. Source: own elaboration



Rys. 2.3. Diagram Czekanowskiego – okres letni przed uporządkowaniem „objektów”. Źródło: opracowanie własne.

Fig. 2.3. Czekanowski's diagram – the summer period before organizing “objects”. Source: own elaboration



Rys. 2.4. Diagram Czekanowskiego – okres letni po uporządkowaniu „obiektów”. Źródło: opracowanie własne

Fig. 2.4. Czekanowski's diagram – the summer period after organizing “objects”. Source: own elaboration

W przypadku okresu zimowego wydzielonych zostało 5, a w przypadku okresu letniego 7 grup o największym podobieństwie (przedział podobieństwa I, tj. grupy bardzo podobne). W okresie zimowym, w przedziale tym (odległości Euklidesa pomiędzy obiektami nie są większe aniżeli 25,171) wyróżnić można:

- grupę nr 1, do której zaliczone zostały tygodnie o numerach: 45 (02.11–08.11), 46 (09.11–15.11) i 51 (14.12–20.12), a dopuszczając nieco większą odległość, dodatkowo 53. tydzień (28.12–31.12), który różni się w większym stopniu od 51. tygodnia (odległość pomiędzy tygodniami 51. a 53. wynosi 29,304);
- grupę 2, do której zaliczone zostały tygodnie o numerach: 49 (30.11–06.12) i 53 (28.12–31.12), a dopuszczając nieco większą odległość, dodatkowo 10. tydzień

(02.03–08.03), który różni się większym stopniu od 53. tygodnia (odległość pomiędzy tygodniami 53. a 10. wynosi 26,871);

- grupę 3, do której zaliczone zostały tygodnie o numerach: 4 (20.01–26.01), 6 (03.02–09.02) i 9 (24.02–01.03), a dopuszczając nieco większą odległość dodatkowo 11. tydzień (09.03–15.03), który różni się w większym stopniu od 4. tygodnia (odległość pomiędzy tygodniami 11. a 4. wynosi 33,603);
- grupę 4, do której zaliczone zostały tygodnie o numerach: 5 (27.01–02.02), 7 (10.02–16.02), 11 (09.03–15.03), 14 (30.03–31.03) i 40 (01.10–04.10);
- grupę 5, do której zaliczone zostały tygodnie nr: 40 (01.10–04.10), 41 (05.10–11.10), 42 (12.10–18.10), 43 (19.10–25.10), 44 (26.10–01.11), 47 (16.11–22.11), 48 (23.11–29.11) i 52 (21.12–27.12).

Na analogicznych zasadach (przedział podobieństwa I, tj. grupy bardzo podobne, dla których odległości Euklidesa pomiędzy „obiektami” nie przekraczają 14,489) dla okresu letniego wyróżnionych zostało 7 grup.

Zestawienie wyników pomiarów stężeń substancji szkodliwych/uciążliwych w powietrzu i grupowania „obiektów” z wynikami obserwacji warunków atmosferycznych (kierunkiem i prędkością wiatru, temperaturą, ciśnieniem i wilgotnością powietrza itd.) pozwala wyznaczyć poziomy związków korelacyjnych pomiędzy ww. elementami. Przykładowo, wykorzystując współczynnik korelacji liniowej Pearsona (r_{xy}), można stwierdzić, iż w okresie zimowym dla tygodni o numerach: 4 (20.01–26.01), 6 (03.02–09.02), 9 (24.02–01.03) i 11 (09.03–15.03) zależność korelacyjna pomiędzy poziomem stężeń pyłów PM_{10} i $PM_{2,5}$ a temperaturą powietrza jest bardzo silna ujemna ($r_{xy}=-0,937$). Korelacja ujemna, ale znacząca występuje w przypadku zależności zachodzących pomiędzy poziomem stężeń pyłów PM_{10} i $PM_{2,5}$ a prędkością wiatru ($r_{xy}=-0,869$), poziomem zawartości pyłów PM_{10} i $PM_{2,5}$ a kierunkiem wiatru ($r_{xy}=-0,769$) czy też zawartością NO_x a prędkością wiatru ($r_{xy}=-0,744$). Dla porównania w przypadku tygodni o numerach: 5 (27.01–02.02), 7 (10.02–16.02), 11 (09.03–15.03), 14 (01.04–05.04.) i 40 (28.09–30.09.) zależność korelacyjna pomiędzy poziomem stężeń pyłów PM_{10} i $PM_{2,5}$ a temperaturą powietrza jest jedynie umiarkowana ujemna ($r_{xy}=-0,518$). Należy zatem stwierdzić, że w warunkach dominujących wiatrów z kierunków południowego i południowo-zachodniego głównej przyczyny rejestrowanych zanieczyszczeń szukać należy w emisji zanieczyszczeń emitowanych przez zakłady przemysłowe (Huta „Łaziska”, Elektrownia „Łaziska” i „Rybnik”) oraz system ciepłowniczy, opierający się w głównej mierze na wykorzystaniu węgla. Konsekwentne wdrażanie przepisów antysmogowych [19] oraz wykorzystanie już istniejących ciągów komunikacyjnych

przebiegających w układzie południkowym (DK 78) lub zbliżonym do południkowego (DW 902) jako rodzaju korytarzy powietrznych, zwłaszcza w warunkach coraz bardziej rygorystycznych norm emisji zanieczyszczeń wytwarzanych przez silniki spalinowe (norma EURO 6 obowiązująca od 2014 roku), może stanowić narzędzie poprawy stanu zanieczyszczenia atmosfery w badanym rejonie. Przy formułowaniu wniosków należy jednak pamiętać, że z uwagi na wprowadzone obostrzenia spowodowane wirusem SARS-CoV-2 (od połowy marca 2020 roku praca wykonywana była w formie zdalnej) natężenie ruchu ulicznego, a zatem i natężenie ruchu na obszarze parkingu Politechniki Śląskiej (miejsca pobierania próbek) były mniejsze aniżeli w okresach normalnego funkcjonowania gospodarki i nie dają właściwego obrazu zanieczyszczenia atmosfery. Według Generalnej Dyrekcji Dróg Krajowych i Autostrad, na podstawie analizy danych uzyskanych z 32 stanowisk pomiarowych wyposażonych w system viaToll, średni ruch pojazdów od 9 marca do 17 maja 2020 roku, wyniósł około 16 500 000 samochodów na dobę, podczas gdy w analogicznym okresie 2019 roku było to 25 300 000 pojazdów, co oznacza spadek o około 35% [20].

2.5. Podsumowanie

Najgroźniejszym efektem smogu jest występowanie w powietrzu wysokich stężeń substancji niebezpiecznych dla życia i zdrowia ludzi. Przekraczanie dopuszczalnych norm zwłaszcza PM₁₀, PM_{2.5} i tlenków azotu oraz benzo(a)pirenu powoduje pogorszenie jakości życia mieszkańców i problemy zdrowotne oraz rosnące niezadowolenie obywateli. Stężenia ww. substancji, podobnie jak stężenia pierwiastków kancerogennych arsenu, kadmu i niklu oraz prawdopodobnie kancerogennego ołowiu są monitorowane w procesie szeroko rozumianej prewencji. Pomiar zanieczyszczeń pyłowych i gazowych realizowane są nie tylko przez stacjonarne stacje pomiarowe, ale także coraz częściej przez mobilne punkty pomiarowe, wykorzystujące w tym celu m.in. mobilne laboratoria. W ramach artykułu autorzy, wykorzystując wyniki pomiarów stężenia: PM₁₀, PM_{2.5}, SO₂, NO, NO_x i O₃ w punkcie pomiarowym zlokalizowanym na terenie kampusu Politechniki Śląskiej (parking przy ul. Konarskiego 20B; 50.292934N, 18.682164E), zaproponowali zastosowanie symetrycznej, kwadratowej macierzy odległości D (odległości Euklidesa pomiędzy r -tym i s -tym „obiektem”) do określenia podobieństwa/zróźnicowania „obiektów” (w tym przypadku okresów pomiarowych, tj. tygodni) oraz ich

grupowania. Zastosowanie metody Czekanowskiego pozwoliło na liniowe uporządkowanie klasyfikowanych „obiektów” (w przestrzeni, której wymiary stanowiły wyniki pomiarów stężeń pyłów i ww. związków chemicznych) i określenie ich skupisk w rozbiu na okres letni (od 01.04.2020 roku do 30.09.2020 roku) oraz okres zimowy (od 1.01.2020 roku do 31.03.2020 roku oraz od 01.10.2020 roku do 31.12.2020 roku). W przyszłości autorzy pragną wykorzystać ww. metodę do analizy wyników pomiarów zanieczyszczenia atmosfery odnotowanych w różnych punktach zlokalizowanych na obszarze całej aglomeracji śląskiej, co nie tylko pozwoli na lepsze rozpoznanie poziomu stężeń wybranych zanieczyszczeń powietrza w pobliżu różnych źródeł emisji oraz w miejscach oddalonych od już istniejących stacji monitoringowych, ale także może być wykorzystane w procesie szacowania ryzyka występowania zagrożeń związanych z zanieczyszczeniem powietrza, sporządzania map rejonów o podobnym poziomie ryzyka i podejmowania działań prewencyjnych w przypadku „obiektów” o „podobnej charakterystyce”.

Podziękowania

Praca została sfinansowana przez Wydział Inżynierii Środowiska i Energetyki Politechniki Śląskiej (badania statutowe).

Bibliografia

1. Manisalidis I., Stavropoulou E., Stavropoulos A., Bezirtzoglou E.: Environmental and Health Impacts of Air Pollution: A Review. *Frontiers in Public Health*, 8, 14, 2020. DOI: 10.3389/fpubh.2020.00014.
2. Juda-Rezler K., Zajusz-Zubek E., Reizer M., Kurek E., Bulska E., Klejnowski K.: Bioavailability of elements in atmospheric PM_{2.5} during winter episodes at Central Eastern European urban background site. *Atmos. Environ.* vol. 245, 2021 (art. no. 117993).
3. World Health Organization (WHO). Air pollution. Cited date January 3, 2022.
4. Meo S.A., Alqahtani S.A., Binmeather F.S., AlRasheed R.A., Aljedaie G.M., Albarrak R.M.: Effect of environmental pollutants PM_{2.5}, CO, O₃ and NO₂ on the incidence and mortality of SARS-COV-2 in largest metropolitan cities, Delhi, Mumbai and Kolkata, India Sultan, *Journal of King Saud University – Science*, 34 101687, 2022.
5. Zoran M.A., Savastru R.S., Savastru D.M., Tautan, M.N.: Assessing the relationship between surface levels of PM_{2.5} and PM₁₀ particulate matter impact on COVID-19 in Milan, Italy. *Sci. Total. Environ.* 738, 2020, 139825. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.139825>.

6. Feng X.D., Dang Z., Huang W.L., Yang C.: Chemical speciation of fine 43 particle bound trace metals. *International Journal of Environmental Science 44 and Technology*, 6 (3), 2009, 337–346.
7. Kaczmarczyk M.: Niska emisja. Efektywność energetyczna w gminach i samorządach, Geosystem, 2017.
8. Zajusz-Zubek, E.: Evaluation of forms in which occur selected trace elements in suspended dust (PM10) and respirable fraction (PM2.5) in the surroundings of coal-fired power plants and coking plants in the non-heating season (Publishing House of Silesian University of Technology, 2016).
9. PN-EN 14212:2013-02/AC:2014-06E Ambient air quality – Standard method for the measurement of the concentration of sulphur dioxide by ultraviolet fluorescence.
10. PN-EN 14211:2013-02 Ambient air quality. Standard method for the measurement of the concentration of nitrogen dioxide and nitrogen monoxide by chemiluminescence.
11. PN-EN 14625:2013-02 Ambient air - Standard method for the measurement of the concentration of ozone by ultraviolet photometry.
12. PN-EN 12341:2014-07 Ambient air – Standard gravimetric measurement method for the determination of the PM10 or PM2,5 mass concentration of suspended particulate matter.
13. Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 11 grudnia 2020 r. w sprawie dokonywania oceny poziomów substancji w powietrzu (Dz.U. z 2020 r., poz. 2279).
14. Trojanowska M., Świetlik R.: Inhalacyjne narażenie środowiskowe mieszkańców miast Polski na metale ciężkie kadm i nikiel oraz arsen, *Medycyna Środowiskowa – Environmental Medicine*, 2012.
15. Czekanowski J.: Zur Differentialdiagnose der Neandertalgruppe, *Korespondentblatt der Deutschen Gesellschaft für Anthropologie, Ethnologie und Urgeschichte*, vol. XL, nr 6/7, 1909, s. 44–47.
16. Czekanowski J.: Metoda podobieństwa w zastosowaniu do badań psychometrycznych, *Badania Psychologiczne*, t. 3, 1926, s. 1–40.
17. Pocięcha J., Podolec B., Sokołowski A., Zając K.: *Metody taksonomiczne w badaniach społeczno-ekonomicznych*. PWN, Warszawa 1988.
18. Jaskulski P.: Instrukcja użytkownika programu MaCzek 3.0.
19. Uchwała NR V/36/1/2017 Sejmiku Województwa Śląskiego z dnia 7 kwietnia 2017 r. w sprawie wprowadzenia na obszarze województwa śląskiego ograniczeń w zakresie eksploatacji instalacji, w których następuje spalanie paliw.
20. <https://spidersweb.pl/bizblog/andrzej-kubisiak-gus-zatrudnienie/>

3. STAN ZAGROŻENIA ŚRODOWISKA ANTROPOGENICZNEGO – PROPOZYCJA WYKORZYSTANIA METODY ANALIZY WIELOKRYTERIALNEJ

3.1. Wprowadzenie

Jednym z ważniejszych efektów zjawiska smogu jest występowanie wysokich stężeń w powietrzu substancji niebezpiecznych dla życia i zdrowia ludzi, a monitorowanie ich stężeń stanowi jeden z filarów działań proekologicznych. Pomiary stężeń pierwiastków śladowych, w tym metali kancerogennych, w różnych frakcjach pyłu zawieszonego PM stanowią istotny element monitoringu jakości powietrza. Ryzyko narażenia zdrowotnego nasila się zwłaszcza w przypadku wpływu frakcji respirabilnych aerozolu i występujących długofalowych oraz skumulowanych skutków w postaci m.in. chorób układu krążenia i nowotworowych [1–3].

Spośród pierwiastków wybranych do badań (As, Cd, Co, Cr, Hg, Mn, Ni, Pb, Sb i Se), według Międzynarodowej Agencji Badań Chorób Nowotworowych (IARC), do grupy pierwiastków kancerogennych dla ludzi należą: arsen, chrom, kadm i nikiel. Do grupy pierwiastków prawdopodobnie kancerogennych dla ludzi należą: kobalt i ołów [4–6].

Ponadnormatywne stężenia pyłu zawieszonego i drobnego w powietrzu stanowią obecnie jeden z istotnych problemów dotyczących zdrowia publicznego. W skład cząstek pyłu zawieszonego wchodzi m.in. metale ciężkie, które są zawarte w ziarnach pyłu lub obecne na ich powierzchni [7].

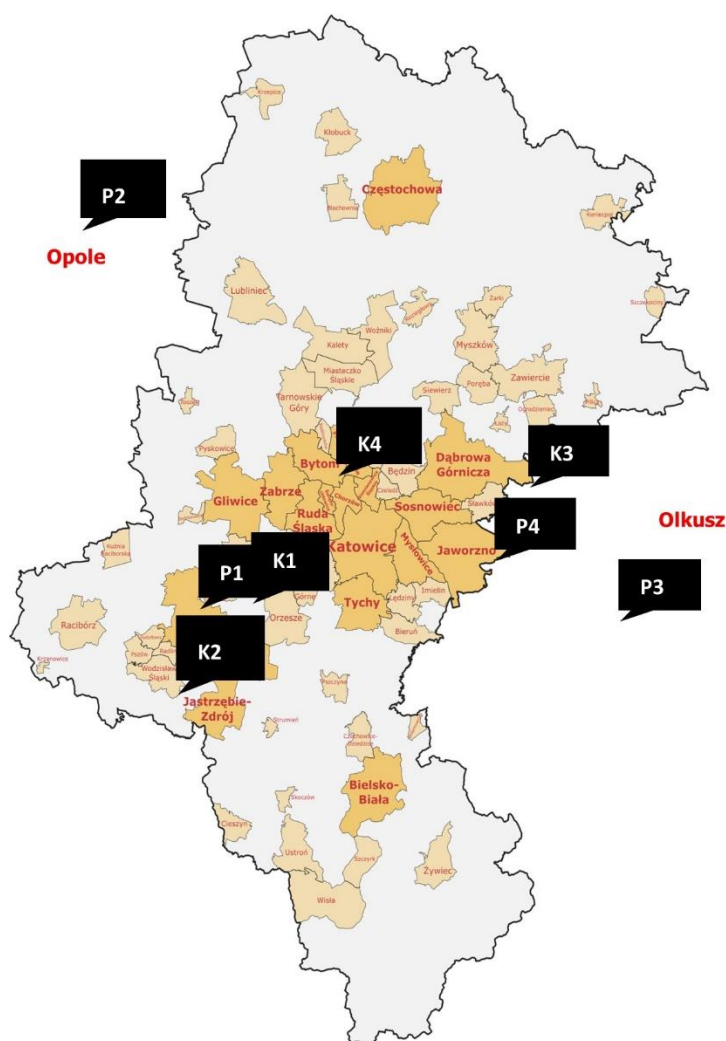
Stężenie i skład cząstek pyłu zawieszonego w określonym miejscu zależą od wielu czynników naturalnych i antropogenicznych, takich jak lokalne oraz regionalne jego źródła, warunki meteorologiczne czy też położenie geograficzne [8, 9].

3.2. Zakres i metodyka badań

Badania przeprowadzono na podstawie bezpośrednich pomiarów w otoczeniu wybranych czterech pracujących elektrowni węglowych opalanych węglem kamiennym i czterech pracujących koksowni.

3.2.1. Lokalizacja punktów pomiarowych

Lokalizację punktów pomiarowych wyznaczono w południowej Polsce, w otoczeniu wybranych czterech pracujących elektrowni opalanych węglem kamiennym i czterech pracujących koksowni. Punkty poboru w otoczeniu elektrowni (P₁, P₂, P₃ i P₄) oraz koksowni (K₁, K₂, K₃ i K₄) usytuowano w odległości ok. 2 km w kierunku północno-wschodnim od odpowiedniego obiektu (rys. 3.1).



Rys. 3.1. Lokalizacja punktów pomiarowych. Źródło: Opracowanie własne na podstawie [13]
 Fig. 3.1. Location of the sampling sites Source: own elaboration based on [13]

Lokalizacja punktów pomiarowych była kompromisem uwzględniającym reprezentatywność receptora oraz możliwości podłączenia aparatury badawczej i zgody właścicieli posesji. Z uwagi na potrzebę wyeliminowania wpływu sezonu grzewczego, a szczególnie niskiej emisji [10], sesje pomiarowe przeprowadzono wyłącznie w okresie letnim. Próbki pyłu zawieszonego pobierano w okresach tygodniowych po 4 sesje w jednym punkcie. Metodologię wykorzystaną w niniejszej pracy szczegółowo omówiono w [11, 12].

3.2.2. Pobieranie próbek

Próbki pyłu zawieszonego (PM_{10}) i jego frakcji respirabilnej ($PM_{2,5}$) zebrane zostały przy użyciu impaktora kaskadowego Dekati® PM_{10} z natężeniem przepływu powietrza $1,8 \text{ m}^3/\text{h}$. Impaktor Dekati® PM_{10} gwarantuje pobór próbek pyłu dla trzech średnic odcięcia: $10 \text{ }\mu\text{m}$, $2,5 \text{ }\mu\text{m}$ oraz $1 \text{ }\mu\text{m}$. Do poboru próbek na pierwszym, drugim i trzecim stopniu impaktora stosowano filtry poliwęglanowe. Na czwartym stopniu pył zbierano na filtrze teflonowym, na którym osadzają się cząstki o średnicy $\leq 1 \text{ }\mu\text{m}$. Średnia objętość przepływającego przez filtry powietrza wynosiła około 300 m^3 . Skuteczność wychwytu impaktora charakteryzowała niepewność na poziomie poniżej 2,8%. Masę pyłu zebranego na poszczególnych stopniach impaktora wyznaczono metodą grawimetryczną i odniesiono do objętości przepuszczonego powietrza ($\mu\text{g}/\text{m}^3$).

Próbki pobierano na wysokości 1,5 m od powierzchni gruntu, czyli w strefie oddychania ludzi. Odpowiednie frakcje pyłu pobrano w cyklach 7-dniowych, w okresie od maja do września 2020 roku (16 tygodni), w otoczeniu czterech pracujących elektrowni węglowych opalanych węglem kamiennym i od maja do sierpnia 2020 roku (16 tygodni), w otoczeniu czterech pracujących koksowni. Kampania pomiarowa obejmowała cztery sesje pomiarowe, oddzielnie dla każdego punktu pomiarowego. Jedna sesja obejmowała pobór próbek pyłu na poszczególnych stopniach impaktora kaskadowego Dekati® PM_{10} oraz filtry stanowiące poziom odniesienia. Długość cykli pomiarowych została uwarunkowana potrzebą zebrania odpowiedniej ilości materiału badawczego (o średnicy aerodynamicznej ziaren pyłu <1 ; $1-2,5$; $2,5-10$ i $>10\mu\text{m}$). Analogiczne (7-dniowe) okresy poboru próbek pyłu zostały zastosowane w badaniach Sanchez-Rodas i in. [14] oraz Schleicher i in. [15]. Filtry poliwęglanowe i teflonowe były kondycjonowane przed i po poborze pyłu w temperaturze $20\pm 1^\circ\text{C}$ (wilgotność względna $50\% \pm 5\%$) przez 48 h, a następnie ważone na mikrowadze z dokładnością do $1 \text{ }\mu\text{g}$ (MXA5/1, RADWAG, Polska).

Uwzględniając sesje pomiarowe w czterech punktach w otoczeniu elektrowni (P₁–P₄) i w czterech punktach w otoczeniu koksowni (K₁–K₄), łączna liczba próbek przekroczyła 450.

3.2.3. Analiza chemiczna

Analizę jakościowo-ilościową otrzymanych dla poszczególnych frakcji roztworów wykonywano metodą spektrometrii mas z jonizacją w plazmie sprzężonej indukcyjnie, korzystając z przyrządu ICP-MS (NexION 300D). Jako wzorce do oznaczeń: ⁷⁵As, ¹¹¹Cd, ⁵⁹Co, ⁵³Cr, ²⁰⁰Hg, ⁵⁵Mn, ⁶⁰Ni, ²⁰⁶Pb, ¹²¹Sb i ⁸²Se wykorzystano roztwory 1000 µg/cm³ CertPUR ICP multi-element standard solution VI for ICP-MS firmy Merck.

Poprawność oznaczenia zawartości pierwiastków zweryfikowano, wykorzystując certyfikowane materiały odniesienia: European Reference Material ERM®–CZ120 and Standard Reference Material SRM 1648a.

3.2.4. Metoda miernika rozwoju – podstawy teoretyczne

W procesie szeroko rozumianej oceny coraz większego znaczenia nabierają miary syntetyczne wyznaczane przez zastosowanie metod rozwiązywania wielokryterialnych problemów decyzyjnych (Multi Attribute Decision Making – MADM). Zaliczana do ww. grupy metoda miernika rozwoju przez zunifikowanie dziedziny porównywanych kryteriów umożliwia ich bezpośrednie porównywanie ze sobą [16–20]. W metodzie tej definiowane są:

- abstrakcyjny punkt P_o obrazujący wzorcowe rozwiązanie o współrzędnych {x_{o1}, x_{o2}, x_{om}} spełniających warunki [1]:

$$x_{oj} = \max x_{ij}, \quad \text{gdy } j \in S, \quad (3.1)$$

$$x_{oj} = \min x_{ij} \quad \text{gdy } j \in D, \quad (3.2)$$

gdzie:

S – zbiór stymulant,

D – zbiór destymulant,

- punkty P_i, będące graficzną interpretacją obiektów poddanych ocenie, a następnie wyznaczane są odległości pomiędzy poszczególnymi punktami P_i i punktem P_o:

$$C_{io} = \sqrt{\sum_{j=1}^m \alpha_j (x'_{ij} - x'_{oj})^2}, \quad (3.3)$$

gdzie:

x'_{ij} – unormowane współrzędne punktu P_i ;

α_j – znaczenie (ranga) j-tej cechy cząstkowej wyznaczone na podstawie sondażu opinii ekspertów lub wg współczynnika zmienności.

Warunkiem podstawowym umożliwiającym wyznaczenie ww. miary (m.in. w celu doprowadzenia zmiennych posiadających różne miana do porównywalności) jest unormowanie zmiennych wyjściowych [21]. W artykule w procesie tzw. normalizacji zmiennych zastosowano przekształcenia ilorazowe, gdzie w zależności od charakteru zmiennych, punktem odniesienia cech (zmiennych) była wartość maksymalna (w przypadku stymulant) lub wartość minimalna (w przypadku destymulant) w zbiorze cech. Końcowa wartość miernika rozwoju m_i ($m_i \in \leq 0; 1 \geq$) obliczona została z zależności:

$$m_i = 1 - C_{io}/C_{io \max}. \quad (3.4)$$

Przyjmuje się, że obiekt jest tym bardziej rozwinięty, im bardziej wartość jego miary zbliża się do wartości 1.

3.3. Omówienie wyników badań

Miejsca pobierania próbek powietrza (punkty pomiarowe) zlokalizowane w sąsiedztwie elektrowni i koksowni zinterpretowane zostały jako punkty w przestrzeni wielowymiarowej (P_1, P_2, \dots, P_8), której współrzędne (odpowiednio $j=1-13$) odpowiadają średnim stężeniom: arsenu, kadmu, kobaltu, chromu, rtęci, manganu, niklu, ołowiu, antymonu, selenu, pyłu PM_{10} , pyłu $PM_{2.5}$ i pyłu PM_1 , jakie odnotowane zostały w drugim i trzecim kwartałach 2020 roku [22]. Wyniki pomiarów zestawione zostały w postaci macierzy $X = |x_{ij}|$, gdzie i odpowiada numerowi „obiekt” poddanego ocenie, j – współrzędnej „obiektu”.

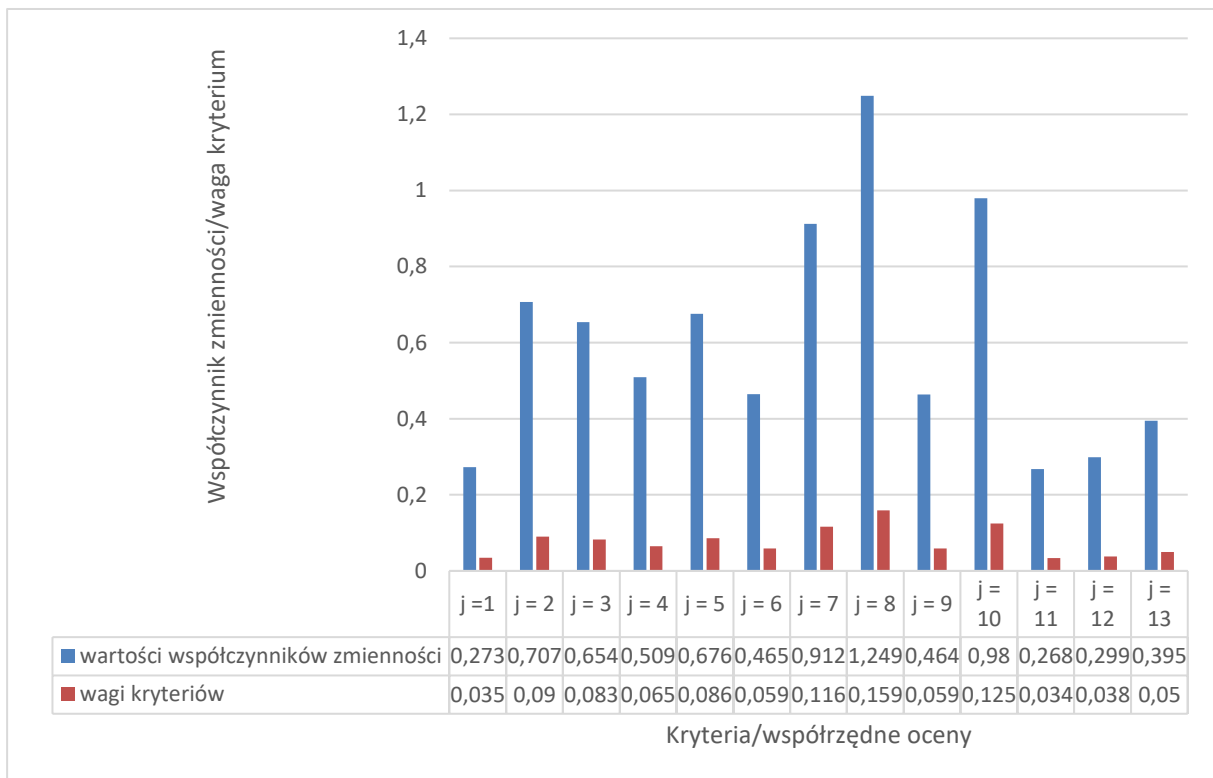
Zestawienie danych wejściowych (wartości średnich stężeń) w zapisie macierzowym:

0,98	1,08	0,47	64,14	1,58	13,22	6,91	13,79	1,54	20,53	18,03	15,52	12,78
0,73	1,21	0,47	64,23	1,56	13,92	5,82	21,84	1,04	21,19	15,92	12,56	8,68
0,76	0,67	0,07	25,1	0,12	8,19	3,07	23,88	0,58	2,05	15,78	12,75	8,74
1,09	1	0,08	25,11	0,07	11,58	0,67	25,35	1,99	1,78	15,58	11,55	8,13

0,89	1,03	0,12	28,23	0,74	10,82	2,63	22,95	1,7	9,24	23,57	18,29	14,09
0,87	0,97	0,23	28,57	0,76	22,95	1,96	19,67	1,17	9,51	22,61	17,75	13,79
1,2	1,84	0,37	80,27	1,69	26,13	16,4	53,35	1,25	1,78	13,3	7,85	3,85
1,57	3,88	0,54	81,26	1,71	29,3	14,72	183,04	2,91	1,8	28,23	21,63	17,35

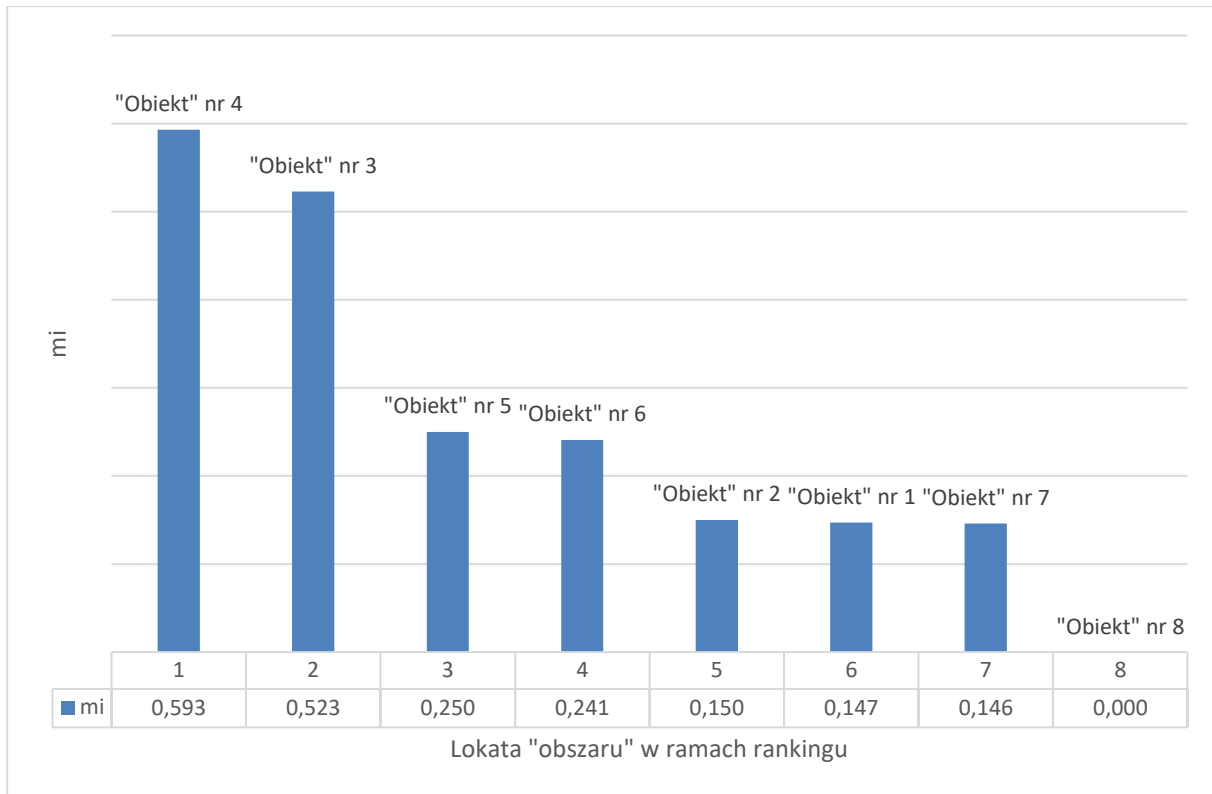
Wszystkie badane cechy mają charakter destymulant, tzn. występuje ujemna korelacja ze zmienną objaśnianą, jaką jest poziom zanieczyszczenia środowiska antropogenicznego.

Wagi kryteriów ustalone zostały z wykorzystaniem współczynnika zmienności. Zestawienie wartości współczynników zmienności i wag kryteriów przedstawia rys. 3.2.



Rys. 3.2. Wartości współczynników zmienności i wagi kryteriów
Fig. 3.2. Values of coefficient of variation and criteria weights

Wyznaczone wartości zagregowane (wartości miernika rozwoju) pozwoliły na budowę rankingu badanych obiektów (rys. 3.3).



Rys. 3.3. Ranking obiektów wg wartości miernika rozwoju

Fig. 3.3. Ranking of objects according to the value of development measure

W przypadku diagnozowanych obiektów (elektrowni i koksowni) wyniki pomiarów stężenia pierwiastków i frakcji pyłów zawieszonych w powietrzu można traktować zarówno jako wyniki końcowe (w ramach oceny jednokryterialnej zagrożenia środowiska antropogenicznego), jak i wyniki cząstkowe (w ramach oceny wielokryterialnej zagrożenia środowiska antropogenicznego). W pierwszym przypadku każdy (i -ty) obiekt poddany został ocenie oddzielnie w ramach j -tego kryterium (każdy obiekt oceniany jest oddzielnie na podstawie stwierdzonych wartości stężenia kolejnych pierwiastków i frakcji pyłów zawieszonych), w drugim – wyniki pomiarów służą wyznaczeniu zagregowanej (syntetycznej) oceny końcowej stanu zagrożenia.

Wyniki ocen jednokryterialnych zestawione zostały w tab. 3.1, co pozwala na opracowanie rankingów obiektów w ramach każdego z przyjętych kryteriów.

Opierając się na wyznaczonych wartościach miernika syntetycznego, można stwierdzić, że obiekty P_4 i P_3 uzyskały najwyższe, zbliżone wartości miernika m_i : pierwsze miejsce w rankingu zajął obiekt P_4 ($m_4=0,593$), drugie – obiekt P_3 ($m_3=0,523$). Obiekt P_4 ($i=4$) jest najbardziej rozwinięty spośród ocenianych obiektów (wartość jego miary m_i jest najbliższa wartości 1,0) mimo że w ramach rankingów sporządzanych na podstawie oceny jednokryterialnej tylko czterokrotnie zajął

pierwsza lokatę (kryterium nr 4: stężenie chromu (ex aequo z obiektem P₃), kryterium nr 5: stężenie rtęci, kryterium nr 7: stężenie niklu i kryterium nr 10: stężenie selenu (ex aequo z obiektem K₃)), przy pięciu czołowych lokatach obiektu P₃ (i=3) (kryterium nr 2: stężenie kadmu, kryterium nr 3: stężenie kobaltu, kryterium nr 4: stężenie chromu, kryterium nr 6: stężenie manganu i kryterium nr 9: stężenie antymonu). Zaistniałą sytuację należy tłumaczyć zarówno miejscami obiektów w przypadku pozostałych obszarów problemowych (w przypadku aż czterech kryteriów: nr 3 (stężenie kobaltu), nr 11 (stężenie pyłu PM₁₀), nr 12 (stężenie pyłu PM_{2,5}) i nr 13 (stężenie pyłu PM₁) obiekt P₄ zanotował drugie lokaty w ramach rankingów, a najgorszą w jego przypadku była siódma lokata w ramach ranking nr 9: stężenie antymonu), jak i wartościami rang przypisanych poszczególnym kryteriom (w przypadku kryteriów nr 9 (stężenie antymonu) i nr 6 (stężenie manganu)).

Tabela 3.1

Wyniki ocen jednokryterialnych

		Kryterium oceny (<i>j</i>)												
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Obiekt	P ₁	0,745	0,620	0,149	0,391	0,044	0,620	0,097	1,000	0,377	0,087	0,738	0,506	0,301
	P ₂	1,000	0,554	0,149	0,391	0,045	0,588	0,115	0,631	0,558	0,084	0,835	0,625	0,444
	P ₃	0,961	1,000	1,000	1,000	0,583	1,000	0,218	0,577	1,000	0,868	0,843	0,616	0,441
	P ₄	0,670	0,670	0,875	1,000	1,000	0,707	1,000	0,544	0,291	1,000	0,854	0,680	0,474
	K ₁	0,820	0,650	0,583	0,889	0,095	0,757	0,255	0,601	0,341	0,193	0,564	0,429	0,273
	K ₂	0,839	0,691	0,304	0,879	0,092	0,357	0,342	0,701	0,496	0,187	0,588	0,442	0,279
	K ₃	0,608	0,364	0,189	0,313	0,041	0,313	0,041	0,258	0,464	1,000	1,000	1,000	1,000
	K ₄	0,465	0,173	0,130	0,309	0,041	0,280	0,046	0,075	0,199	0,989	0,471	0,363	0,222

gdzie: $j=1$ – średnie stężenie arsenu, $j=2$ – średnie stężenie kadmu, $j=3$ – średnie stężenie kobaltu, $j=4$ – średnie stężenie chromu, $j=5$ – średnie stężenie rtęci, $j=6$ – średnie stężenie manganu, $j=7$ – średnie stężenie niklu, $j=8$ – średnie stężenie ołowiu, $j=9$ – średnie stężenie antymonu, $j=10$ – średnie stężenie selenu, $j=11$ – średnie stężenie pyłu PM₁₀, $j=12$ – średnie stężenie pyłu PM_{2,5}, $j=13$ – średnie stężenie pyłu PM₁.

Obiekt K₃, co prawda czterokrotnie plasował się na pierwszym miejscu w ramach rankingów jednostkowych (kryteria nr 10–13), ale też wagi kryteriów nr 11, 12 i 13 należały do najniższych, a średnie stwierdzone stężenia rtęci i niklu były najwyższe w gronie badanych obiektów.

Najniższa wartość miernika rozwoju uzyskał obiekt K₄ ($m_8=0,000$) – w tym przypadku tylko stężenia niklu ($j=7$) i selenu ($j=10$) nie były najwyższe w zbiorze badanych obiektów.

3.4. Podsumowanie

Industrializacja i rozwój technologiczny obok poprawy standardów życiowych mają także negatywne konotacje, czego potwierdzeniem jest m.in. stan środowiska antropogenicznego. Uwaga ta dotyczy także stanu powietrza – negatywne skutki zdrowotne powodują zarówno pierwiastki kancerogenne (arsen, chrom, kadm i nikiel), prawdopodobnie kancerogenne (kobalt i ołów), nieklasyfikowane jako kancerogenne dla zdrowia (selen), jak i pył zawieszony z jego właściwościami chemicznymi, fizycznymi i biologicznymi (w przypadku wykorzystanych w artykule wyników pomiarów środowiskowych nie stwierdzono przekroczenia standardów WHO oraz poziomów dopuszczalnych, obowiązujących w polskim ustawodawstwie w odniesieniu do stężenia pyłu zawieszonego PM_{10} oraz zawartych w nim pierwiastków kancerogennych, a także stężenia frakcji respirabilnej $PM_{2,5}$). Aktualnie problemem nie są pomiary ww. elementów czy też ich archiwizowanie. Problem stanowi sposób wykorzystania wyników monitoringu m.in. w procesie szeroko rozumianej prewencji. W opinii autorów dysponowanie informacją szybką, aktualną i dokładną, połączone z wykorzystaniem informacji liczbowej, często przy jednoczesnym stosowaniu technik informatycznych (metody symulacji, metody aktywnego sterowania, metody prognozowania itp.) może w znaczący sposób wpłynąć na jakość podejmowanych decyzji, zmierzających także do poprawy jakości powietrza.

Zaproponowany w artykule model przetwarzania informacji stanowi przykład kompleksowego podejścia do wyników pomiarów parametrów środowiskowych (informacji zawartych np. w postaci baz danych), dzięki czemu możliwe jest ukierunkowanie działań prewencyjnych nie tylko na te, które wynikają z uwzględnienia niezależnie od siebie, pojedynczych parametrów opisujących, ale wszystkich monitorowanych czynników szkodliwych (uciążliwych) występujących w środowisku.

Podziękowania

Praca została sfinansowana przez Wydział Inżynierii Środowiska i Energetyki Politechniki Śląskiej (badania statutowe).

Bibliografia

1. Lin Y., Zou J., Yang W., Li C.Q.: A review of recent advances in research on PM_{2.5} in China, *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2018, 15.
2. Pope C.A., Turner M.C., Burnett R.T., Jerrett M., Gapstur S.M., Diver W.R., et al.: Relationships between fine particulate air pollution, cardiometabolic disorders, and cardiovascular mortality., *Circulation Research*, 2015, 116, 108–15.
3. Samoli E., Stafoggia M., Rodopoulou S., Ostro B., Alessandrini E., Basagaña X., et al.: Which specific causes of death are associated with short term exposure to fine and coarse particles in Southern Europe? Results from the MED-PARTICLES project, *Environment International*, 2014, 67, 54–61.
4. Risher J., DeWoskin R., Report: Toxicological profile for mercury, U.S. DEPARTMENT OF HEALTH AND HUMAN SERVICES. Public Health Service. Agency for Toxic Substances and Disease Registry, 1999, 1–676.
5. Lucchini R.G., Aschner M., Kim Y., Šarić M.: Manganese, 2014.
6. Nordberg G.F., Fowler B.A., Nordberg M.: *Toxicology of Metals: Overview, Definitions, Concepts, and Trends*, Fourth Edi, Elsevier, 2014.
7. Yadav S., Satsangi P.G.: Characterization of particulate matter and its related metal toxicity in an urban location in South West India, *Environmental Monitoring and Assessment*, 2013, 185, 7365–7379.
8. Schladitz A., Leníček J., Beneš I., Kováč M., Skorkovský J., Soukup A., et al.: Air quality in the German-Czech border region: A focus on harmful fractions of PM and ultrafine particles, *Atmospheric Environment*, 2015, 122, 236–249.
9. Titos G., Lyamani H., Pandolfi M., Alastuey A., Alados-Arboledas L.: Identification of fine (PM₁) and coarse (PM₁₀₋₁) sources of particulate matter in an urban environment, *Atmospheric Environment*, 2014, 89, 593–602.
10. Zajusz-Zubek E., Mainka A., Korban Z., Pastuszka J.S.: Evaluation of highly mobile fraction of trace elements in PM₁₀ collected in Upper Silesia (Poland): Preliminary results, *Atmospheric Pollution Research*, 2015, 6.
11. Zajusz-Zubek E., Kaczmarek K., Mainka A.: Trace elements speciation of submicron particulate matter (PM₁) collected in the surroundings of power plants, *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2015, 12, 13085–13103.
12. Zajusz-Zubek E., Radko T., Mainka A.: Fractionation of trace elements and human health risk of submicron particulate matter (PM₁) collected in the surroundings of coking plants, *Environmental Monitoring and Assessment*, 2017, 189.
13. https://pl.wikipedia.org/wiki/Miasta_w_wojew%C3%B3dztwie_%C5%9B1%C4%85skim
14. Sanchez-Rodas D., Sanchez De La Campa A., Oliveira V., De La Rosa J.: Health implications of the distribution of arsenic species in airborne particulate matter, *Journal of Inorganic Biochemistry*, 2012, 108, 112–114.
15. Schleicher N.J., Norra S., Chai F., Chen Y., Wang S., Cen K., et al.: Temporal variability of trace metal mobility of urban particulate matter from Beijing – A contribution to health impact assessments of aerosols, *Atmospheric Environment*, 2011, 45, 7248–7265.
16. Hwang C.-L., Yoon K.: *Multiple Attribute Decision Making, Lecture Notes in Economics and Mathematical Systems*, No. 186, Springer 1981.
17. Nowak M.: Preference and veto thresholds in multicriteria analysis based on stochastic dominance. “*European Journal of Operational Research*”, No. 158, 2004, p. 339-350.
18. Roy B., Bouyssou D.: *Aide Multicritere a la Decision: Methodes at Cas*, Economica. Paris 1993.

19. Trzaskalik T., Wachowicz T. (red.): *Multiple Criteria Decision Making '12*. Wydawnictwo Uniwersytetu Ekonomicznego w Katowicach, Katowice 2012.
20. Zaráś K., Martel J.M.: *Multiattribute Analysis Based on Stochastic Dominance*, [in:] Munier B., Machina M.J. (eds.): *Models and Experiments in Risk and Rationality*. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht 1994.
21. Mynarski S. (red.): *Badania przestrzenne rynku i konsumpcji. Przewodnik metodyczny*. Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 1992.
22. Zajusz-Zubek E.: *Evaluation of forms in which occur selected trace elements in suspended dust (PM10) and respirable fraction (PM2.5) in the surroundings of coal-fired power plants and coking plants in the non-heating season*, Publishing House of Silesian University of Technology, Gliwice 2016.

4. DŁUGOOKRESOWE POMIARY WPLYWU DROGOWEJ TRASY ŚREDNICOWEJ NA STAN POWIETRZA W GLIWICACH

4.1. Wprowadzenie

Transport drogowy jest klasyfikowany jako jeden z głównych źródeł zanieczyszczeń powietrza [1–4]. Ciągła tendencja wzrostowa liczby samochodów przyczyniła się do wdrażania coraz to bardziej restrykcyjnych norm emisyjnych, jak również budowy i poprawy jakości oraz przepustowości dróg. Jednak w dalszym ciągu obserwuje się wzrost wpływu motoryzacji na środowisko [5, 6], co w efekcie przyczynia się do podejmowania dalszych działań ograniczających oddziaływanie na środowisko. Podejmując takie działania, trzeba uwzględnić jedną z typowych cech zagrożenia powodowanego ruchem samochodowym – silną zmienność czasową z wyraźnymi, maksymalnymi wartościami stężeń. Potwierdzają to opracowania wykonane przez różnych autorów w typowych warunkach miejskich [7–10].

Natężenie ruchu samochodowego oraz emisja z nim związana charakteryzują się cyklicznością w 24-godzinnym okresie o znacznej amplitudzie. Badania nad zmiennością zagrożeń motoryzacyjnych wymagają, ze względu na krótki okres zmienności stężeń zanieczyszczeń emitowanych z silników, stosowania ciągłych pomiarów stężeń. Powinny być one prowadzone w taki sposób, aby uzyskane wartości związane były przede wszystkim ze źródłami motoryzacyjnymi, przy czym udział w nich innych źródeł jest możliwie znikomy.

Drogowa Trasa Średnicowa (DTŚ) Katowice-Gliwice jest niezwykle istotnym elementem komunikacyjnym oraz ekonomicznym z punktu widzenia dla całego, silnie zurbanizowanego obszaru tzw. konurbacji katowickiej, będącej policentryczną formą urbanistyczną, współcześnie integrująca 52 gminy województwa śląskiego i 2 gminy z województwa małopolskiego, na obszarze 1354 km² zamieszkałym przez 172,6 tys. mieszkańców (w 2021 roku) [11]. Konurbacja ta tworzy największy w Polsce teren zaglomerowany. Na obszarze konurbacji znajduje się ważny węzeł komunikacyjny, usytuowany na przecięciu dwóch traktów o znaczeniu europejskim – autostrad A1 i A4. Około 12% ruchu pojazdów wewnątrz konurbacji stanowi ruch tranzytowy,

przebiegający głównie przez system tych autostrad, pozostałe 88% to ruch lokalny. Jego intensywność wymusiła wdrożenie na terenie konurbacji zintegrowanego systemu komunikacji zbiorowej, którego DTŚ jest elementem najważniejszym [12].

Celem badań była ocena zależności pomiędzy natężeniem ruchu drogowego a stężeniem dwutlenku azotu na rozpatrywanym odcinku drogi. Stężenie dwutlenku azotu zostało zmierzone bazując na metodzie różnicowej, optycznej spektroskopii absorpcyjnej, z zastosowaniem analizatora OPSIS zlokalizowanego na DTŚ w centralnej części Gliwic. Natężenie ruchu drogowego zostało przyjęte na podstawie danych automatycznego systemu monitoringu Zarządu Dróg Miejskich w Gliwicach.

4.2. Metodyka pomiarowa

Do pomiaru stężeń dwutlenku azotu wykorzystano urządzenie marki OPSIS, którego działanie opiera się na technice DOAS (z ang. Differential Optical Absorption Spectroscopy). Metoda ta wykorzystuje prawo absorpcji Lamberta-Berra. Określa ono zależności występujące pomiędzy ilością promieniowania absorbowanego na trasie wiązki światła a liczbą molekuł, które znajdują się wzdłuż toru pomiarowego. Pomiar oparty jest na emisji wiązki światła ze źródła, które stanowi wysokociśnieniowa lampa ksenonowa, wzdłuż specjalnie obranej ścieżki pomiarowej. Lampa ta emituje promieniowanie świetlne o stałym natężeniu oraz szerokim spektrum, uwzględniając między innymi promieniowanie podczerwone oraz ultrafioletowe. Odbiornik, podobnie jak nadajnik, również jest wyposażony w lustro, w którym zostaje skupione światło na końcu światłowodu, znajdującego się w ognisku zwierciadła. Po przejściu przez badany ośrodek wiązka dociera do odbiornika, skąd przesyłana jest do spektrometru. Za pomocą spektrometru przeprowadzana jest analiza, która umożliwia określenie wielkości strat światła na skutek absorpcji wzdłuż ścieżki pomiarowej [13, 14]. Pomiar został ograniczony jedynie do NO_2 ze względów technicznych. Były one wykonywane ponad ekranami dźwiękochłonnymi na wyjściu trasy z wykopu w pobliżu ulicy Konarskiego (rys. 4.2). Do analizy wydzielono okres od 2018 roku do 2020 roku z niewielkimi przerwami, związanymi z serwisowaniem układu.

Źródło światła zostało umieszczone na budynku Pogotowia Ratunkowego, odbiornik w oknie budynku wydziału Inżynierii Środowiska i Energetyki Politechniki Śląskiej (rys. 4.1).



Rys. 4.1. Nadajnik oraz odbiornik układu pomiarowego DOAST firmy OPSIS
 Fig. 4.1. Transmitters and receiver of the measuring system DOAST by OPSIS

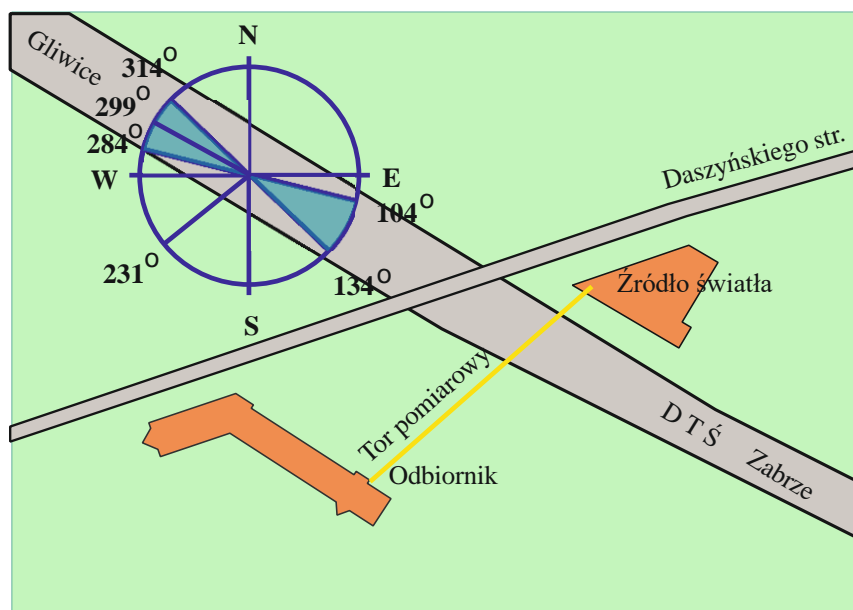
Parametry pomiarowe są następujące:

- wysokość posadowienia źródła: ok. 5 m ponad powierzchnię terenu,
- wysokość posadowienia odbiornika: ok. 8 m ponad powierzchnię terenu,
- długość czynna ścieżki pomiarowej: 144 m,
- kierunek osi pomiarowej względem północy: ok. 231° ,
- kierunek osi DTŚ (wschód-zachód): ok. 299° (rys. 4.2).

Podczas obliczeń uwzględniających kierunki wiatru, różę wiatrów podzielono na przedziały kierunków wiatru $104\text{--}134^\circ$ oraz $284\text{--}314^\circ$ reprezentuje kierunki napływu mas powietrza w okolice toru pomiarowego, które mogą być identyfikowane z ruchem samochodów na drogowej trasie średnicowej (kierunki wiatrów $104^\circ\text{--}134^\circ$ to napływ zanieczyszczeń od strony Zabrze, a kierunki $284\text{--}314^\circ$ napływ zanieczyszczeń od strony Gliwic). Dobór taki jest związany ze wzajemnym położeniem osi wiązki pomiarowej oraz osi podłużnej DTŚ i uwzględnia założenie, że źródła emisji względem osi trasy mogą być odchylone o nie więcej niż $\pm 15^\circ$. Natomiast dla kierunków wiatru prostopadłych przyjęto najmniejszy wpływ DTŚ na stan zanieczyszczeń w otaczającym powietrzu.

W trakcie pomiarów zanieczyszczeń powietrza parametry meteorologiczne były oznaczane za pomocą stacji meteorologicznej DAVIS Vantage PRO2. W celu oddzielenia sytuacji meteorologicznych implikujących wpływ ruchu wzdłuż DTŚ na wyniki pomiarów od sytuacji niemających takiego wpływu, dostępne dane podzielono na trzy grupy: w pierwszej były to stężenia przy kierunkach wiatru w przedziale $104\text{--}134^\circ$ napływ od strony Zabrze w drugiej $284\text{--}314^\circ$ napływ od strony Gliwic,

w trzeciej grupie wyniki uzyskane podczas prostopadłego napływu powietrza do osi DTŚ (rys. 4.2).



Rys. 4.2. Zakresy kierunków róży wiatrów użyte do obliczeń oddziaływania DTŚ
Fig. 4.2. Wind rose direction ranges used to calculate the DTS impact

Pomiary porównawcze wykonano za pomocą miernika NO_2 Firmy TELEDYNE T200, który jest na wyposażeniu mobilnego laboratorium pomiarów immisji zanieczyszczeń powietrza. W trakcie pomiarów mobilne laboratorium było ustawione bezpośrednio obok ekranu dźwiękochłonnego DTŚ od strony nadajnika OPSIS, pod torem pomiarowym układu optycznego. Czerpnia do poboru zanieczyszczeń gazowych znajduje się na wysokości 3,2 m (rys. 4.3).



Rys. 4.3. Mobilne laboratorium pomiarów immisji zanieczyszczeń powietrza oraz nadajnik układu optycznego z zainstalowaną stacją meteorologiczną
Fig. 4.3. A mobile laboratory for air pollution immission measurements and an optical system transmitter with a meteorological station

4.3. Wyniki pomiarów – podział na okresy grzewczy i pozagrzewczy

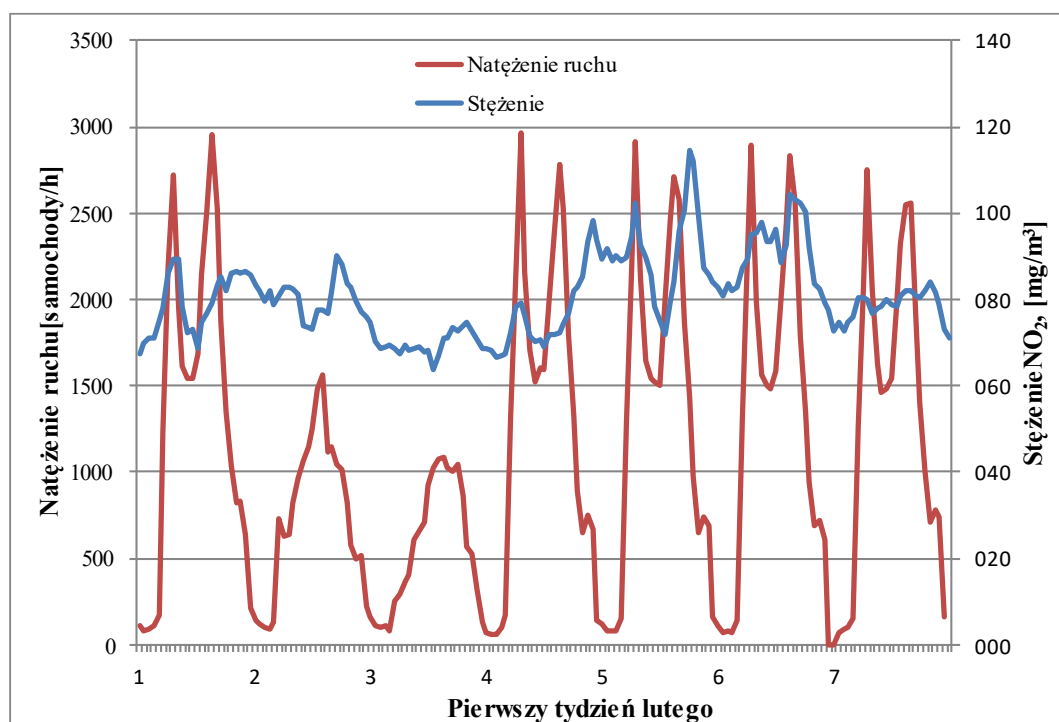
Wykonano analizę, w której zbadano zależność stężenia NO_2 od natężenia ruchu drogowego z rozróżnieniem okresów grzewczego (zima) i pozagrzewczego (lato). Wartości średnie dla całego okresu pomiarowego wynosiły odpowiednio w okresie grzewczym $79,48 \mu\text{g}/\text{m}^3$ oraz $72,56 \mu\text{g}/\text{m}^3$ w okresie pozagrzewczym (tab. 4.1).

Tabela 4.1

Wartość średnia stężenia NO_2 oraz współczynnik korelacji

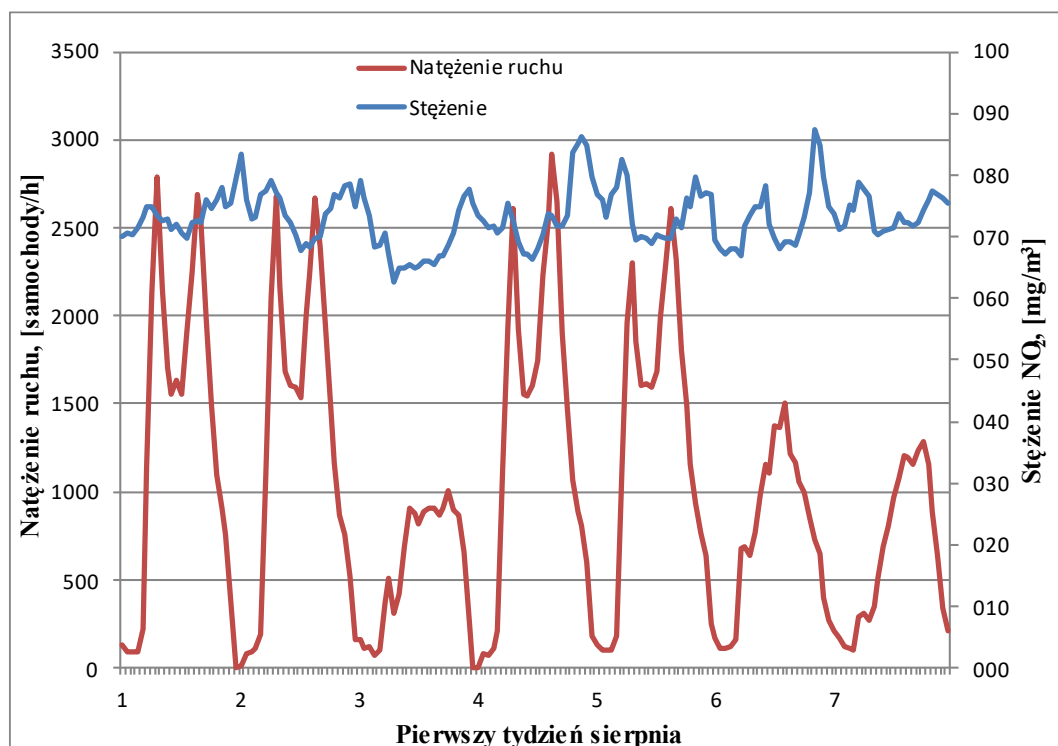
	Zima	Lato
Wartość średnia stężenia NO_2	$79,48 \mu\text{g}/\text{m}^3$	$72,56 \mu\text{g}/\text{m}^3$
Współczynnik korelacji	0,16	-0,002

Przebiegi stężeń przedstawiono na wybranych fragmentach dla pierwszych tygodni miesięcy luty i sierpień 2019 roku (rys. 4.4, rys. 4.5). Szczególną uwagę zwracają regularnie występujące piki stężeń NO_2 i natężenia ruchu, które mogły świadczyć o wysokiej zależności stężenia NO_2 od natężenia ruchu, jednak nie ma to odzwierciedlenia w wartości współczynników korelacji, które wynoszą odpowiednio 0,16 w okresie grzewczym oraz -0,002 w okresie pozagrzewczym.



Rys. 4.4. Zależność stężenia zanieczyszczeń od natężenia ruchu w lutym, w czasie jednego tygodnia (okres grzewczy)

Fig. 4.4. Dependence of pollutant concentration on traffic intensity in February over a period of one week (heating season)



Rys. 4.5. Zależność stężenia zanieczyszczeń od natężenia ruchu w sierpniu, w czasie jednego tygodnia (okres pozagrzewczy)

Fig. 4.5. Dependence of pollutant concentration on traffic intensity in August over a period of one week (non-heating period)

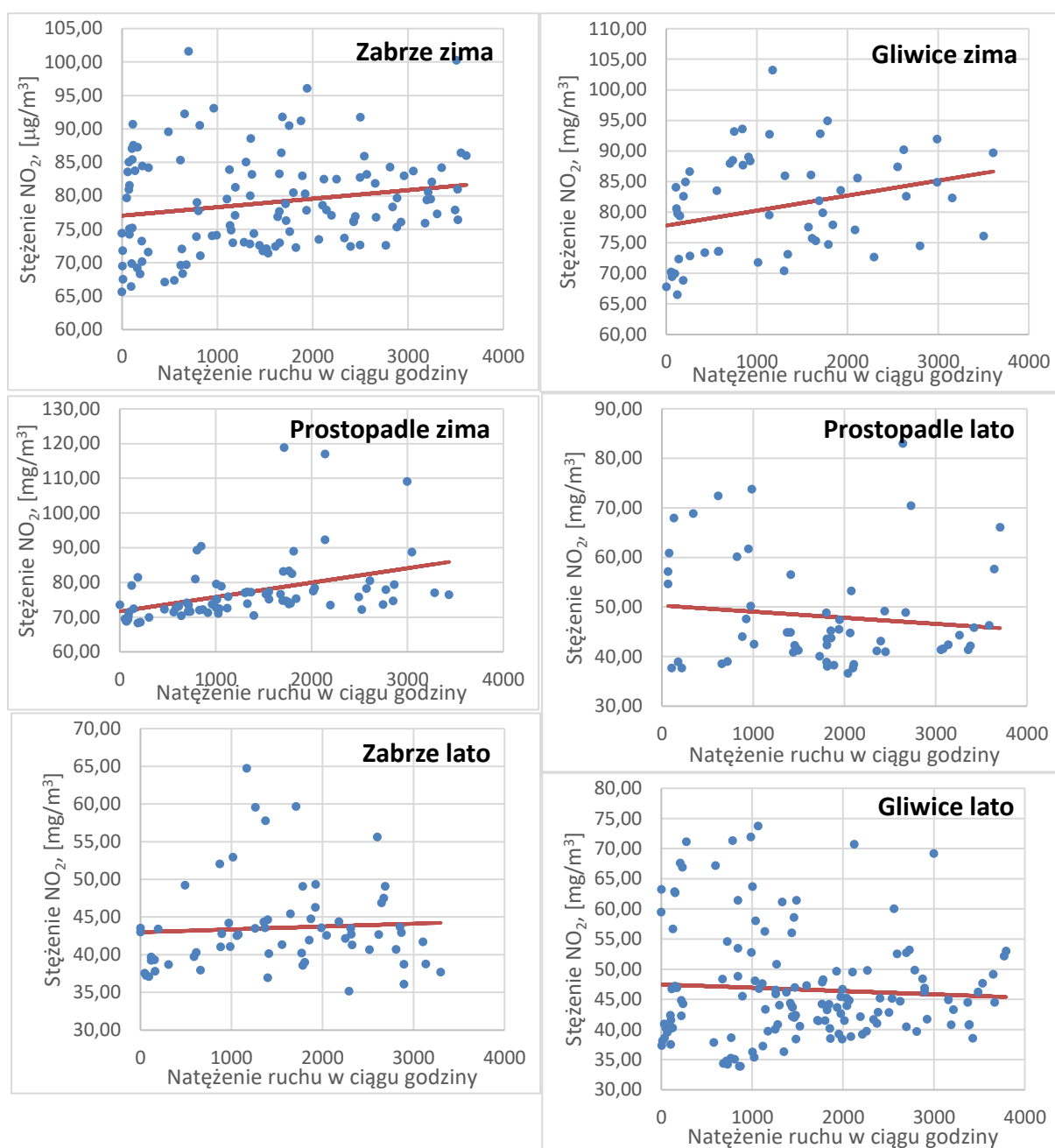
Wartości maksymalne stężenia NO₂ zarówno w okresie zimowym, jak i letnim pokrywały się z największym natężeniem ruchu, występującym o godzinie 7:00–8:00 rano.

4.3.1. Wyniki pomiarów uwzględniające kierunki wiatrów

W drugim etapie analizy wyników uwzględniono kierunek wiatru, w celu oceny napływu zanieczyszczeń od drogi DTŚ (tab. 4.2).

W przypadku okresu grzewczego współczynniki korelacji mają większe wartości od współczynnika korelacji wyznaczonego dla wszystkich pomiarów stężeń NO₂ od natężenia ruchu (0,16) i wynosiły odpowiednio dla kierunku napływu powietrza od strony Gliwic 0,29, a od strony Zabrze 0,4; potwierdzają to wykresy rozrzutu (rys. 4.6).

Jednak również w tym przypadku jest to zależność słaba nieprzekraczająca wartości 0,5, świadcząca o nieznacznym udziale stężenia NO₂ emitowanego z samochodów poruszających się drogą DTŚ.



Rys. 4.6. Wykresy rozrzutu pomiędzy liczbą pojazdów a stężeniem NO₂, uwzględniające sezon grzewczy i pozagrzewczy, kierunki napływu powietrza równoległe do DTS od strony Gliwic i Zabrze oraz prostopadłe do osi jezdni

Fig. 4.6. Scatter diagrams between the number of vehicles and NO₂ concentration, taking into account the heating and non-heating seasons, directions of air flow parallel to the DTS from Gliwice and Zabrze and perpendicular to the road axis

Tabela 4.2

Wartość stężeń NO₂ oraz współczynnik korelacji dla poszczególnych kierunków wiatru

Sezon	zima			lato		
Kierunek wiatru	Gliwice	Zabrze	prostopadle	Gliwice	Zabrze	prostopadle
Minimalne, [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]	66,46	65,1	68,2	33,1	35,6	37,9
Maksymalne, [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]	104,2	102,3	118,4	74,8	65,02	74,7
Średnie, [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]	76,5	78,3	70,9	43,9	46,2	48,06
Współczynnik korelacji	0,296	0,4	0,193	-0,0622	-0,117	-0,039
Odchylenie stan.	6,68	11,36	7,49	4,49	3,83	4,54

4.3.2. Porównanie dwóch metod pomiarowych

W miesiącu 03.2019 wykonano pomiary porównawcze dwóch metod pomiarowych (miernikami OPSIS i T200).

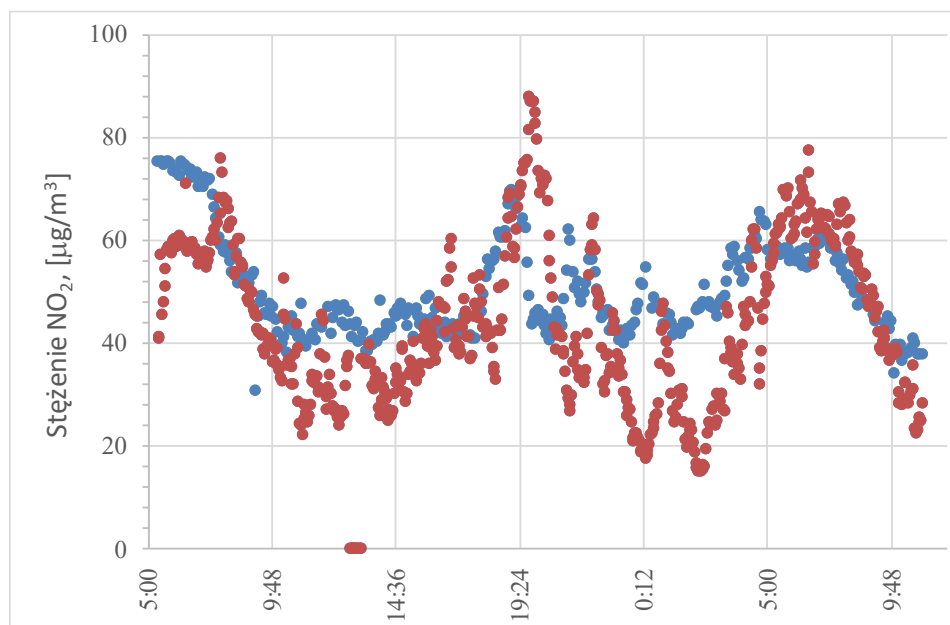
W tabeli 4.3 przedstawiono maksymalne i średniodobowe stężenia dwutlenku azotu zarejestrowane w trakcie trwania pomiaru. Wartość maksymalna wynosiła odpowiednio dla pomiarów miernikiem OPSIS 75,5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, a dla miernika T200 87,9 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Natomiast średnie wartości wynosiły OPSIS 48,0 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ i T200 28,0 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (tab. 4.3). Różnice w pomiarach mogą wynikać z różnic związanych z zasadą działania mierników – OPSIS dokonuje pomiarów uśrednionych na całym torze wiązki światła, a miernik T200 bada zanieczyszczenia w jednym punkcie. Ze względu na uśrednianie wartości wzdłuż toru pomiarowego różnica stężeń między maksimum a minimum była mniejsza dla układu optycznego i wynosiła 44,8 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, a dla miernika T200 69,6 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Położenie toru pomiarowego miernika OPSI było wyższe o około 2 m od lokalizacji czerpni miernika T200, z czym jest związana wyższa wartość maksymalna stężenia NO₂, wynosząca 87,9 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ dla pomiarów wykonanych miernikiem T200.

Tabela 4.3

Wartości średnich, minimalnych, maksymalnych stężeń NO₂ [$\mu\text{g}/\text{m}^3$] w powietrzu zmierzone dwiema metodami

	OP SIS	T200
Średnie	48,0	28,0
Minimalne	30,7	18,3
Maksymalne	75,5	87,9

Na rys. 4.7 przedstawiono wykres zmian stężenia dwutlenku azotu zarejestrowane przez urządzenie analizujące OPSIS oraz T200. Można na nim zauważyć, iż wzrosty i spadki stężeń pokrywają się dla obu mierników przez cały czas trwania pomiaru porównawczych.



Rys. 4.7. Stężenie NO₂ zmierzone w powietrzu miernikami OPSIS (punkty niebieskie) oraz T200 (punkty czerwone) dla przykładowej doby

Fig. 4.7. NO₂ concentration measured in the air with OPSIS (Blue points) and T200 (Red points) meters for an exemplary day

4.4. Wnioski

Stężenia całkowite NO₂ na rozpatrywanym szlaku komunikacyjnym wykazują wahania okresowe o okresie zbliżonym do 1 doby.

Największa korelacja stężenia NO₂ od natężenia ruchu występowała w sezonie grzewczym, przy kierunku wiatru równoległym do Drogowej Trasy Średnicowej napływającym od strony Gliwic.

Współczynnik korelacji, wbrew intuicyjnym oczekiwaniom, nie przekracza wartości 0,5. Może to świadczyć o istnieniu innych źródeł emisji, które związane są ze znacznym zagęszczeniem dróg lokalnych oraz wysokich wartości zanieczyszczeń powietrza związanych z niską emisją silnie zurbanizowanej części Gliwic.

Badania potwierdziły tezę, iż powstanie drogowej trasy średnicowej ze znacznym natężeniem ruchu w Gliwicach nie wpłynęło negatywnie na stan powietrza w mieście,

wręcz udrożnienie i upłynnienie ruchu lokalnego na obszarze miast Gliwic i Katowic przez DTŚ przyczynia się do poprawy jakości powietrza.

Bibliografia

1. Juda-Rezler K.: Oddziaływanie zanieczyszczeń powietrza na środowisko, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2006.
2. Chłopek Z.: Ochrona środowiska naturalnego. Wydawnictwo Komunikacji i Łączności, Warszawa 2002.
3. Merkiś J.: Wpływ motoryzacji na skażenie środowiska naturalnego. Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, Poznań 1994.
4. Mysłowski J.: Zanieczyszczenia powietrza przez pojazdy samochodowe. Wydawnictwo Komunikacji i Łączności, Warszawa 2011.
5. Siemiński M.: Środowiskowe zagrożenia zdrowia, PWN, Warszawa 2007.
6. Rup K.: Procesy przenoszenia zanieczyszczeń w środowisku naturalnym, Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, Warszawa 2006.
7. Żak M., Żak M.: Zanieczyszczenia powietrza tlenkami azotu wzdłuż ciągów komunikacyjnych Gliwic, Ochrona Powietrza i Problemy Odpadów 4 (180), 113–117, 1997.
8. Cepeda M., Schoufour J., Freak-Poli R., Koolhaas Ch., Dhana K., Bramer W.M., Franco O.H.: Levels of ambient air pollution according to mode of transport: a systematic review, *Lancet Public Health*, Vol. 2, January 2017.
9. Stępniewska Z., Szafranek A.: Stężenie tlenków azotu (NO_x) w cyklu rocznym w punkcie kontrolnym na terenie Lublina, *Acta Agrophysica* 78, 249–256, Lublin 2002.
10. Health Effects Institute Panel on the Health Effects of Traffic-Related Air Pollution. Traffic-related air pollution: a critical review of the literature on emissions, exposure, and health effects. Boston: Health Effects Institute, 2010.
11. Kaczmarek R., Kubica A., Garbacz M., Rott-Urbańska J.: Encyklopedia Województwa Śląskiego, tom 9, Instytut Badań Regionalnych Biblioteki Śląskiej 2022.
12. Rozbicka K.: Charakterystyka zanieczyszczenia powietrza atmosferycznego tlenkami azotu na obszarze aglomeracji warszawskiej ze szczególnym uwzględnieniem Ursynowa, *Przegląd Naukowy Inżynieria i Kształtowanie Środowiska*, 62–73, 2007.
13. Platt U., Stutz J.: The Design of DOAS Instruments. W U. Platt and J. Stuts, *Differential Optical Absorption Spectroscopy, Physics of Earth Environments*, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 175–280, 2008.
14. Pundt I.: DOAS tomography for the localization and qualification of anthropogenic air pollution, Springer-Verlag, p. 18–21, 2006.

5. NARAŻENIE NA DWUTLENEK AZOTU W CZASIE DOJAZDU DO PRACY ROWEREM W REJONIE GLIWIC

5.1. Wprowadzenie

Powszechnie wiadomo, że zanieczyszczenia powietrza wpływają na zdrowie ludzi, a efekt zdrowotny zależy od stężeń danego zanieczyszczenia w zależności od miejsca ekspozycji ludzi, częstości i czasu trwania narażenia, a także drogi wchłaniania do organizmu. Czas przeznaczony na dojazdy do pracy jest zdecydowanie krótszy w porównaniu z okresem przebywania wewnątrz pomieszczeń. Codzienne dojazdy mogą przyczyniać się do nieproporcjonalnie dużego dziennego narażenia na zanieczyszczenia powietrza, szczególnie na obszarach miejskich o dużym natężeniu ruchu [2, 4]. W grupie zanieczyszczeń emitowanych przez ruch uliczny Światowa Organizacja Zdrowia (WHO) [25] wymienia pył zawieszony (PM) wraz z frakcją ultradrobną (UFP), tlenek węgla (CO), ozon (O₃), tlenki azotu (NO_x), lotne związki organiczne (LZO), kancerogeny i ołów. Spośród zanieczyszczeń emitowanych przez transport samochodowy największy udział mają NO_x [26]. Mimo że wśród NO_x emitowanych z transportu dominujący udział ma NO, jednak w otaczającym powietrzu NO jest łatwo utleniany do NO₂ [9]. Najbardziej powszechną drogą konwersji NO do NO₂ jest utlenianie przez O₃. Konwersja ta zachodzi stosunkowo szybko i często zakłada się, że jest natychmiastowa, choć w rzeczywistości szybkość reakcji może być rzędu dziesiątek sekund do kilku minut, w zależności od ilości O₃ i LZO, energii słonecznej oraz warunków meteorologicznych [12].

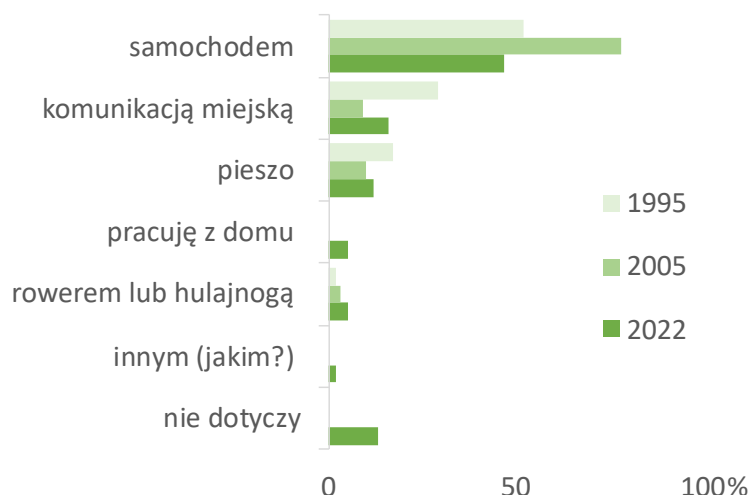
5.1.1. Dwutlenek azotu (NO₂)

Pod względem biochemicznym NO₂ jest bardziej aktywny i bardziej toksyczny niż NO [17]. Jest silnym utleniaczem, podobnie jak O₃, choć mniej reaktywnym. Jako utleniacz działa na białka, powodując uszkodzenia tkanek układu oddechowego [11]. Zgodnie z Dz. U. 2021 poz. 845 jednogodzinne stężenie dopuszczalne dla NO₂ ze

względem na ochronę zdrowia ludzi wynosi $200 \mu\text{g}/\text{m}^3$, wartość średnioroczna wynosi $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$ [5], natomiast WHO zaleca czterokrotnie niższą wartość stężenia średniorocznego oraz podaje zalecane stężenie średniodobowe wynoszące $25 \mu\text{g}/\text{m}^3$, dla porównania Unia Europejska (EU) nie wskazuje dopuszczalnego stężenia średniodobowego dla NO_2 . W wielu opracowaniach literaturowych dotyczących wpływu NO_2 na zdrowie człowieka podkreśla się negatywne skutki ekspozycji na jego wysokie stężenia [10, 18, 21], które sprzyjają występowaniu chorób układu oddechowego, sercowo-naczyniowego i mózgowego oraz zwiększonej śmiertelności [20, 22]. Jednocześnie dane epidemiologiczne wskazują, że nawet niskie dawki wchłanianego NO_2 mogą powodować podrażnienie błony śluzowej gardła i jamy ustnej oraz spojówek, co może prowadzić do zapalenia tchawicy i innych niealergiczych chorób układu oddechowego [7, 8]. Jak wskazano w przeglądzie literatury [16] na każdy wzrost stężenia NO_2 o $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ odnotowano wzrost całkowitej śmiertelności o około 0,3% i 4,1%, odpowiednio w przypadku narażenia krótkoterminowego i długoterminowego. W polskim badaniu [3] największy wpływ na hospitalizacje związane z zapaleniem płuc w aglomeracjach Trójmiasta miał właśnie NO_2 , a wzrost stężenia NO_2 o $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ wiązał się z nawet 11% wzrostem liczby codziennych hospitalizacji związanych z zapaleniem płuc.

5.1.2. Dojazdy do pracy

Zgodnie z danymi przytaczanymi przez Parlament Europejski transport jest jedynym sektorem, który w ostatnich latach zwiększył emisję zanieczyszczeń do atmosfery. Wśród działań mających na celu redukcję emisji zanieczyszczeń z sektora transportu na szczeblach regionalnym i lokalnym wymienia się m.in. rozbudowę infrastruktury rowerowej oraz promocję jeżdżenia rowerem po mieście i do pracy. Mimo że Polacy coraz chętniej wprowadzają ekonawyki do swojego stylu życia, jednakże w kwestii transportu zmiany idą w wolniejszym tempie [6]. Jak wynika z Raportu Ministerstwa Klimatu i Środowiska z marca 2022 roku w odpowiedziach na pytanie: Jakim środkiem transportu najczęściej docierasz do pracy? 47% rodaków wskazało samochód. Dla porównania wyniki badań ankietowych z 1995 i 2005 r. [13] wskazywały podobny udział w 1995 roku, natomiast w 2005 roku samochód był najczęstszym środkiem transportu dla 78% respondentów z powiatów o wysokim poziomie motoryzacji (rys. 5.1).



Rys. 5.1. Środki transport wykorzystywane w dojazdach do pracy
 Fig. 5.1. Means of transport used in commuting to work

Jazda na rowerze jest jednym z najbardziej zrównoważonych i przyjaznych dla środowiska sposobów podróżowania [15, 24]. Instytucje zdrowia publicznego zalecają jazdę na rowerze, zarówno jako formę aktywności fizycznej, jak i jako środek transportu redukujący natężenie ruchu, emisję hałasu i stężenia zanieczyszczeń powietrza [23].

W świetle korzyści indywidualnych i środowiskowych, wyzwaniem dla badaczy jest promowanie jazdy na rowerze w krajach takich jak Polska, w których nie jest ona powszechna. Oprócz potrzeby zapewnienia odpowiednich udogodnień dla rowerzystów, jednym z głównych problemów jest postrzeganie jazdy na rowerze jako bezpiecznego środka transportu. Stąd też celem niniejszego artykułu jest zbadanie poziomu narażenia na NO_2 w czasie jazdy na rowerze, w zależności od sezonu grzewczego i niegrzewczego. Należy podkreślić, że obecnie brak jest danych dotyczących rzeczywistego narażenia rowerzystów na komunikacyjne zanieczyszczenia powietrza w Europie środkowo-wschodniej.

5.2. Metodyka badań

Przeanalizowano wyniki pomiarów stężeń NO_2 oceniono dla 78 przejazdów rowerem zarówno na obszarze miasta Gliwice, jak i pozamiejskim powiatu gliwickiego. Pomiar przeprowadzono w okresie od 14.01.2022 r. do 9.11.2022, który na podstawie średniej temperatury powietrza podzielono na okres grzewczy, obejmujący miesiące od stycznia do końca kwietnia oraz listopad, a także

pozagrzewczy od maja do końca października. W badaniu wzięły udział 2 osoby – kobieta i mężczyzna.

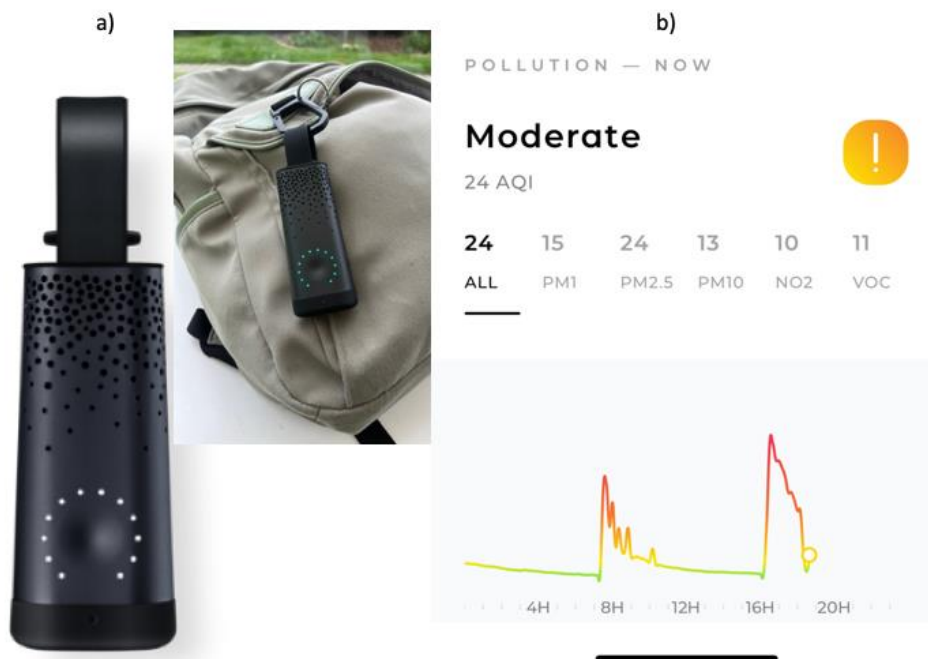
Pomiary stężeń NO_2 wykonano za pomocą niskokosztowego, osobistego czujnika Flow 2 firmy PlumeLabs, który wraz z NO_2 monitoruje stężenia LZO, PM_{10} , $\text{PM}_{2,5}$ i PM_1 . Urządzenie ma licznik laserowy rozpraszający światło, który mierzy stężenie cząstek stałych oraz czujnik tlenu metalu, który mierzy stężenie gazów. Interwał czasowy jest stały i wynosi 60 sekund. Współpraca z aplikacją na telefonie umożliwiła rejestrowanie wyników w postaci wykresów i przesyłanie szczegółowych danych. Na rys. 5.2 przedstawiono czujnik Flow 2 wraz z zrzutem ekranu z aplikacji. Stężenia NO_2 są prezentowane w ppb, stąd w artykule stężenia NO_2 przeliczono na $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (przelicznik to 1,91). Zgodnie z danymi producenta, współczynnik korelacji dla NO_2 , wyznaczony na podstawie pomiarów porównawczych z urządzeniem referencyjnym, którym był monitor NO_x model APNA370 firmy Horiba, mieści się w zakresie 84–99% [19].

Do przygotowania danych wykorzystano aplikację napisaną w języku Python. Jej zadaniem było rozdzielenie danych pomiarowych, względem zapisanej lokalizacji, na odrębne ścieżki. W tym celu stworzono algorytm, który sprawdza ciągłość pomiarów w zależności od położenia geograficznego w przeciągu 5 minut do przodu i do tyłu badanego czasu. Początkowy czas ustawiono na 5 minut wstecz od badanego czasu, a następnie algorytm szuka, czy w przeciągu 10 minut wystąpił następny pomiar. Jeśli w danych zostało zapisane położenie, algorytm zapisuje lokalizację do ścieżki i sprawdza kolejne położenie. W przypadku braku jakiegokolwiek pomiaru w przeciągu 10 minut cała ścieżka z zapisanymi lokalizacjami zapisuje się w bazie danych. Następnie do każdej ścieżki przypisywane są pomiary stężeń zanieczyszczeń zapisane przez czujnik Flow.

Po rozdzieleniu pomiarów stężeń zanieczyszczeń na odrębne ścieżki możliwe było obliczenie danych wynikowych. Dla każdego zanieczyszczenia obliczono wartości średnie, maksymalne i minimalne, odchylenie standardowe oraz 95% przedział ufności. Dla każdej ścieżki wyliczono również dystans za pomocą biblioteki GeoPy oraz prędkość za pomocą napisanego algorytmu. Obliczał on dystans oraz czas pomiędzy dwoma pomiarami lokalizacji i z wykorzystaniem wzoru $V = \frac{S}{t}$ obliczono prędkość V , gdzie S to dystans, a t to czas. Czynności te powtórzono między następującymi po sobie lokalizacjami. Następnie wszystkie obliczone dystanse dodano do siebie, osiągając finalny dystans trasy, natomiast listę z prędkościami posortowano

i wyznaczono prędkość średnią z 30% najszybszych uzyskanych prędkości i ustawiono ją jako prędkość na danej trasie.

Wyznaczenie prędkości pozwoliło na opracowanie algorytmu wyznaczania typu trasy. Zakresy prędkości dla każdego typu trasy wyznaczono na podstawie informacji o typie poruszania się przez użytkownika. Dla roweru wybrano zakres prędkości 10–40 km/h. Ostatecznie wszystkie wyniki obliczeń zapisano w pliku csv, który posłużył do dalszej analizy danych.



Rys. 5.2. a) Czujnik Flow 2, b) zrzut ekranu z aplikacji
Fig. 5.2. a) Flow 2 sensor, b) screenshot from the app

5.3. Wyniki pomiarów

W tabeli 5.1 zebrano dane meteorologiczne oraz średnie stężenie NO₂ dla danego miesiąca, monitorowane na terenie Politechniki Śląskiej przy użyciu mobilnego laboratorium pomiarów immisji. Temperatura średnia w 2022 roku w Gliwicach wynosiła 10,8°C. Wilgotność wynosiła 71,8%, nie obserwowano wysokich prędkości wiatru, który wiał najczęściej z kierunku południowo-zachodniego. Średnioroczne stężenie NO₂, mimo że nie przekroczyło poziomu dopuszczalnego w EU (40 µg/m³), przekroczyło wartość zalecaną przez WHO o 88%, co może negatywnie wpływać na zdrowie mieszkańców miasta Gliwice.

Tabela 5.1

Parametry meteorologiczne oraz stężenia NO₂ monitorowane przez mobilne laboratorium pomiarów immisji – średnia w danym miesiącu

miesiąc	Wartość średnia parametru na dany miesiąc					
	Temperatura, °C	Wilgotność, %	Ciśnienie atmosferyczne, hPa	Prędkość wiatru, km/h	Kierunek wiatru, °deg	Stężenie NO ₂ , µg/m ³
I	1,6	79,0	994,2	1,9	240,3	16,1
II	4,8	72,0	984,8	2,4	223,4	11,0
III	4,6	54,2	1000,6	1,4	151,9	29,9
IV	7,8	67,5	986,2	1,5	184,2	20,3
V	15,5	59,2	993,6	1,1	175,0	19,0
VI	20,5	64,3	991,5	1,2	168,9	16,2
VII	20,9	64,5	992,7	1,5	202,4	13,4
VIII	21,3	70,6	992,4	1,0	181,7	17,7
IX	13,7	79,1	988,9	1,0	186,2	17,9
X	11,9	81,0	996,1	0,9	205,3	19,8
XI	5,3	85,1	992,0	1,0	218,9	23,1
XII	1,7	84,5	991,1	1,3	191,7	21,3
śr.	10,8	71,8	992,0	1,4	194,1	18,8

W tabeli 5.2 zebrano dane dotyczące przejazdów rowerem, w każdym z analizowanych miesięcy. Analiza obejmuje w sumie 70 tras o długości od 0,1 km do 18,9 km. Kobieta średnio przejeżdżała trasę o długości 2,4 km, natomiast mężczyzna 7,9 km. Średnie stężenie NO₂, jakie monitorowano w czasie pojedynczego przejazdu rowerem wynosiło 30,17 µg/m³. Narażenie rowerzystów o zbliżonym stężeniu NO₂ (27 µg/m³) stwierdzono w Zhengzhou, Chiny [4]. Dla porównania wyższe wartości stężeń, na które narażeni byli rowerzyści stwierdzono w Montrealu, Kanada (76 µg/m³) [1] oraz Mediolanie, Włochy (63 µg/m³) [2], natomiast w Utrechcie, Dania stężenia były istotnie niższe (17 µg/m³) [14]. Na podstawie iloczynu wartości stężenia NO₂, czasu ekspozycji, wentylacji minutowej dla osoby dorosłej jadącej na rowerze (przyjęto 18 l/min) oraz długości pokonanej trasy wyznaczono dawkę wdychanego NO₂ w odniesieniu do 1 km przejechanej trasy. Jak wynika z tabeli 5.2 najwyższe dawki wchłaniane na 1 km obserwowano w miesiącach maju, wrześniu i październiku.

Na podstawie wartości temperatury średniomiesięcznej podzielono okres pomiarowy na grzewczy (temperatura <10°C) i pozagrzewczy (temperatura >10°C). Do okresu grzewczego przyporządkowano miesiące od stycznia do końca kwietnia

oraz listopada, w grudniu nie prowadzono badań. Natomiast dla okresu pozagrzewczego uwzględniono miesiące od maja do października. Stwierdzono statystycznie istotną różnicę ($p < 0,05$) między średnim narażeniem rowerzystów na NO_2 w sezonie grzewczym, ($24,0 \mu\text{g}/\text{m}^3$) a pozagrzewczym ($35,5 \mu\text{g}/\text{m}^3$). Dodatkowo na rys. 5.3 zaprezentowano trasy o najwyższych stężeniach NO_2 , które występowały w centrum Gliwic w dniu 14.02.2022 ($113,1 \mu\text{g}/\text{m}^3$) oraz poza miastem 12.05.2022 ($103,2 \mu\text{g}/\text{m}^3$).

Tabela 5.2

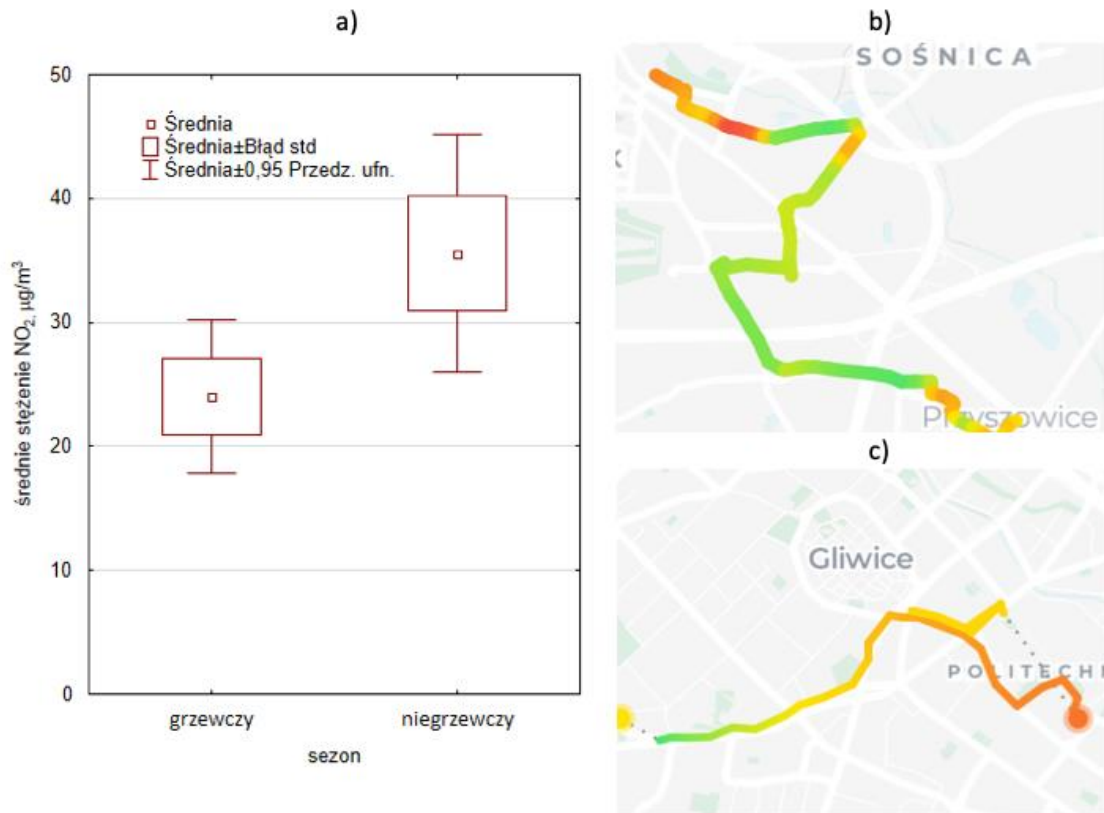
Średnie stężenia NO_2 mierzone czujnikiem Flow 2 oraz przez mobile laboratorium pomiarów immisji w czasie podróży rowerem

miesiąc	Liczba tras	Wartość średnia w okresie przejazdów rowerem								
		Czujnik Flow				Laboratorium		Średnia dla trasy		Dawka, $\mu\text{g}/\text{km}$
		$\text{NO}_2, \mu\text{g}/\text{m}^3$				$\text{NO}_2, \mu\text{g}/\text{m}^3$		Dystans, km	Czas, min	
		śr.	min	max	SD	N	śr.			
I	2	11,30	1,51	21,09	13,84	2	20,31	8,0	55	1,4
II	9	14,86	1,08	62,18	18,87	8	12,26	7,8	38	1,3
III	22	16,97	0,09	87,77	22,70	21	30,65	8,0	43	1,6
IV	15	32,32	6,74	61,32	17,21	11	17,62	7,9	58	4,3
V	5	31,02	7,21	44,05	15,57	5	15,81	2,2	43	11,0
VI	10	25,56	2,11	55,24	19,02	9	15,58	1,2	25	9,5
VII	2	27,25	24,79	29,71	3,48	1	28,35	6,1	30	2,4
VIII	1	14,36	-	-	-	1	23,67	1,8	24	3,5
IX	1	46,35	-	-	-	1	15,23	0,9	14	12,9
X	6	60,42	17,68	85,11	25,37	6	16,83	2,2	28	14,2
XI	5	51,42	31,38	74,49	17,40	5	20,98	2,6	27	9,7
śr.	7	30,17	7,30	52,88	13,95	6	19,75	M: 7,9 K: 2,4	M: 47 K: 25	6,52

N – liczba analizowanych okresów tożsamyh z okresami dla przejazdów rowerem; M – mężczyzna; K – kobieta

Wyniki analizy porównawczej stężeń NO_2 rejestrowanych przez mierniki personalne Flow oraz urządzenie zainstalowane w mobilnym laboratorium pomiarów immisji zlokalizowanym na terenie kampusu Politechniki Śląskiej świadczą o istnieniu dużych rozbieżności pomiędzy rzeczywistym narażeniem rowerzystów a stanem jakości powietrza miejskiego. Różnice pomiędzy danymi o jakości powietrza uzyskanymi za pomocą pomiarów wykonywanych w mobilnym laboratorium, a także w trakcie pomiarów personalnych mogą wynikać z wielu czynników. Między innymi

występują różnice w zasadzie działania przyrządów pomiarowych. Dlatego też planuje się rozszerzyć metodykę badawczą o pomiary porównawcze i ewentualne wyznaczenie wskaźnika korekcji, za pomocą którego można by było ograniczyć błąd wynikający z wykorzystywania różnych technik pomiarowych.



Rys. 5.3. a) Wykresy pudełkowe dla stężeń NO₂, na które narażeni byli badani rowerzyści w zależności od sezonu, b) przykładowa trasa z lutego, c) przykładowa trasa z maja – widok z aplikacji

Fig. 5.3. a) Box plots for NO₂ concentrations to which surveyed cyclists were exposed, according to season, b) example route in February, c) example route in May – view from application

5.4. Podsumowanie i wnioski

Długotrwałe narażenie na NO₂ jest jedną z przyczyn zwiększonej zachorowalności na choroby układu oddechowego. Dotąd tylko nieliczne badania skupione były na indywidualnych ekspozycjach krótkookresowych, a wyniki pomiarów stężeń NO₂ w czasie podróży rowerem są jak dotychczas słabo poznane. Wyraźną lukę stanowią pomiary narażenia na zanieczyszczenia powietrza podczas jazdy rowerem w regionach o wysokim poziomie zanieczyszczeń, gdzie ta forma dojazdu do pracy dopiero zyskuje na popularności.

W publikacji przedstawiono ocenę narażenia na NO₂ dla dwójki ochotników, którzy regularnie podróżują do pracy/uczelni na rowerze. Przeprowadzone badania personalne pozwoliły na określenie pełnego zakresu wartości stężeń, na jakie są narażone osoby podróżujące rowerem w centrum i okolicy miasta Gliwice. Uzyskane wyniki świadczą o obecności podwyższonej wartości stężeń NO₂ zarówno w centrum miasta, jak i poza nim. Wśród tych wyników można wyróżnić wartości szczytowe od 103–113 µg/m³, które odnotowano w miesiącach marcu, czerwcu i październiku. Zwrócono uwagę, że średnie narażenie na NO₂ w sezonie grzewczym było o 11,5 µg/m³ wyższe niż poza nim (24,0 µg/m³). Różnica w narażeniu pomiędzy sezonami jest statystycznie istotna i niepokojąca zarówno ze względu na przekroczenia wartości średniodobowej, rekomendowanej przez WHO (25 µg/m³), jak i ze względu na możliwe efekty zdrowotne, które są raportowane przy wzroście stężenia NO₂ o 10 µg/m³.

Podsumowując, przeprowadzone analizy skłaniają do rozwinięcia badań nad użytecznością wyników pomiarów przeprowadzanych za pomocą niskokosztowych czujników jakości powietrza do oceny ekspozycji personalnej osób zamieszkujących tereny zurbanizowane.

Podziękowania

Praca sfinansowana przez Politechnikę Śląską w ramach badań statutowych Wydziału Inżynierii Środowiska i Energetyki oraz Wydziału Automatyki, Elektroniki i Informatyki

Bibliografia

1. Apparicio P., Carrier M., Gelb J., Séguin A.M., Kingham S.: Cyclists' exposure to air pollution and road traffic noise in central city neighbourhoods of Montreal "Journal of Transport Geography", Vol. 57, 2016, p. 63–69.
2. Boniardi L., Borghi F., Straccini S., Fanti G., Campagnolo D., Campo L., Olgiati L., Lioi S., Cattaneo A., Spinazzè A., et al.: Commuting by car, public transport, and bike: exposure assessment and estimation of the inhaled dose of multiple airborne pollutants commuting by car, public transport, and bike: Exposure assessment and estimation of the inhaled dose of multiple airborne pollutants "Atmospheric Environment", Vol. 262, 2021, p. 118613.
3. Dąbrowiecki P., Badyda A., Chciałowski A., Czechowski P.O., Wrotek A.: Influence of selected air pollutants on mortality and pneumonia burden in Three Polish Cities over the years 2011–2018 "Journal of Clinical Medicine", Vol. 11, 2022, p. 3084.

4. deSouza P., Lu R., Kinney P., Zheng S.: Exposures to multiple air pollutants while commuting: evidence from Zhengzhou, China “Atmospheric Environment”, Vol. 247, 2021, p. 118168.
5. Dz.U. 2021 poz. 845 Obwieszczenie Ministra Klimatu i Środowiska w sprawie ogłoszenia jednolitego tekstu rozporządzenia Ministra Środowiska w sprawie poziomów niektórych substancji w powietrzu, 2021.
6. FOCUS ON Business: Czym najchętniej podróżują Polacy? <https://focusonbusiness.eu/pl/wiadomosci/czym-najchetniej-podrozuja-polacy/25967> (dostęp: 16.05.2023).
7. Ghermandi G., Fabbi S., Veratti G., Bigi A., Teggi S.: Estimate of Secondary NO₂ levels at two urban traffic sites using observations and modelling “Sustainability”, Vol. 12, 2020, p. 7897.
8. Guarnieri M., Balmes J. R.: Outdoor air pollution and asthma “The Lancet”. 2014, Vol. 383, p. 1581–1592.
9. Hagenbjörk A., Malmqvist E., Mattisson K., Sommar N.J., Modig L.: The spatial variation of O₃, NO, NO₂ and NO_x and the relation between them in two Swedish cities “Environmental Monitoring and Assessment”, Vol. 189, 2017, p. 161.
10. Hesterberg T.W., Bunn W.B., McClellan R.O., Hamade A.K., Long C.M., Valberg P.A.: Critical review of the human data on short-term nitrogen dioxide (NO₂) exposures: Evidence for NO₂ no-effect levels “Critical Reviews in Toxicology”, Vol. 39, 2009, p. 743–781.
11. Hood D.B., Gettins P., Johnson D.A.: Nitrogen dioxide reactivity with proteins: Effects on activity and immunoreactivity with α -1-proteinase inhibitor and implications for NO₂-mediated peptide degradation “Archives of Biochemistry and Biophysics”, Vol. 304, 1993, p. 17–26.
12. Kimbrough S., Owen R.C., Snyder M., Richmond-Bryant J.: NO to NO₂ Conversion rate analysis and implications for dispersion model chemistry methods using Las Vegas, Nevada near-road field measurements, “EPA Public Access Graphical Abstract Atmospheric Environment 1994”, Vol. 165, 2017, p. 23–24.
13. Komornicki T.: Geographical Studies No. 227 Transformations in the daily mobility of Poles against the background of development of car ownership, Instytut Geografii I Przestrzennego Zagospodarowania PAN im. Stanisława Leszczyckiego, Warszawa 2011.
14. Lu M., Schmitz O., Vaartjes I., Karssenber D.: Activity-based air pollution exposure assessment: Differences between homemakers and cycling commuters “Health and Place”, Vol. 60, 2019, p. 102233.
15. Ma L., Ye R., Wang H.: Exploring the causal effects of bicycling for transportation on mental health “Transportation Research Part D”, Vol. 93, 2021, p. 102773.
16. Mainka A., Żak M.: Synergistic or antagonistic health effects of long- and short-term exposure to ambient NO₂ and PM_{2.5}: A review “International Journal of Environmental Research and Public Health”, Vol. 19, 2022, p. 14079.
17. Manahan S.E.: Toksykologia środowiska – aspekty chemiczne i biochemiczne, PWN, Warszawa 2006.
18. Morrow P.E.: Toxicological data on NO_x: An overview “Journal of Toxicology and Environmental Health”, Vol. 13, 1984, p. 205–227.
19. PlumeLabs Evaluation of Flow, a personal air quality sensor, 23 May 2019.

20. Public Health England: The effects of long-term exposure to ambient air pollution on cardiovascular morbidity: mechanistic evidence. A report by the Committee on the Medical Effects of Air Pollutants, 2018.
21. Santana J.C.C., Miranda A.C., Yamamura C.L.K., da Silva Filho S.C., Tambourgi E.B., Ho L.L., Berossaneti F.T.: Effects of air pollution on human health and costs: Current situation in São Paulo, Brazil “Sustainability (Switzerland)”, Vol. 12, 2020, p. 4875.
22. Sheehan M.C., Lam J., Navas-Acien A., Chang H.H.: Ambient air pollution epidemiology systematic review and meta-analysis: A review of reporting and methods practice “Environment International”, Vol. 92–93, 2016, p. 647–656.
23. Sottile E., Sanjust di Teulada B., Meloni I., Cherchi E.: Estimation and validation of hybrid choice models to identify the role of perception in the choice to cycle “International Journal of Sustainable Transportation”, Vol. 13, 2019, p. 543–552.
24. Synek S., Koenigstorfer J.: Health effects from bicycle commuting to work: Insights from participants of the German company-bicycle leasing program “Journal of Transport & Health”, Vol. 15, 2019, p. 100619.
25. World Health Organization: WHO global air quality guidelines. Particulate matter (PM_{2.5} and PM₁₀), ozone, nitrogen dioxide, sulfur dioxide and carbon monoxide. Geneva, 2021.
26. Żak M., Loster A., Melaniuk-Wolny E., Kozielska B.: Air contamination with nitrogen dioxide in the vicinity of Gliwice transport routes before opening the A4 motorway fragment Kleszczow-Gliwice “Archives of Environmental Protection”, Vol. 33, 2007, p. 3–15.

6. PROFILAKTYKA ZWIĄZANA Z REDUKCJĄ ZANIECZYSZCZENIA POWIETRZA PYŁAMI W ASPEKCIE OCENY RYZYKA ZDROWOTNEGO ZWIĄZANEGO ZE SZKODLIWYM ODDZIAŁYWANIEM PYŁU KOPALNIANEGO NA ORGANIZM CZŁOWIEKA – STUDIUM PRZYPADKU

6.1. Wprowadzenie

Pyły są jednym z głównych czynników szkodliwych występujących w środowisku pracy. Główną drogą przedostawania się pyłów do organizmu człowieka jest układ oddechowy. Działanie pyłów na organizm ludzki może być przyczyną mechanicznego uszkodzenia błon śluzowych, choroby uczuleniowej, pylicy płuc, a także choroby nowotworowej [1].

Głównymi źródłami emisji pyłów na stanowiskach pracy są procesy technologiczne. W zależności od rodzaju zastosowanego procesu technologicznego, emitowane pyły charakteryzują się różnymi własnościami. Do najbardziej pyłotwórczych procesów technologicznych należy: mielenie, kruszenie, przesiewanie, transport i mieszanie ciał sypkich. Jednakże najwięcej pyłów wysokodispersyjnych, najbardziej szkodliwych dla ludzi, powstaje w trakcie ostrzenia, szlifowania oraz polerowania [1].

Pyły można podzielić – ze względu na rodzaj działania biologicznego, szkodliwego dla człowieka – na te o działaniu: drażniącym, zwłókniającym, kancerogennym i alergizującym. Ważnymi parametrami wpływającymi na skutki działania pyłu na organizm człowieka są: stężenie pyłu, wymiary i kształt cząstek oraz skład chemiczny i struktura krystaliczna, a także rozpuszczalność pyłu w płynach ustrojowych. Właściwości osobnicze człowieka, zarówno genetyczne, jak i nabyte, mogą również wpływać na jego wrażliwość na działanie pyłu. Ostateczny skutek szkodliwego działania pyłów przemysłowych zależy także od ciężkości wykonywanej pracy fizycznej. Ze względu na skutki zdrowotne, najważniejsze są cząstki frakcji respirabilnej [2], tzn. frakcji aerozolu wnikającej do dróg oddechowych, która stwarza zagrożenie dla zdrowia po zdeponowaniu w obszarze wymiany gazowej, określona

zgodnie z normą PN-EN 481. Ten pył jest odpowiedzialny za rozwój pylicy płuc, większości nowotworów oraz zapalenia pęcherzyków płucnych [1, 3].

Tryb i częstotliwość dokonywania badań i pomiarów czynników szkodliwych dla zdrowia występujących w środowisku pracy reguluje Rozporządzenie Ministra Zdrowia z dnia 02.02.2011 r., zgodnie z którym pracodawca, w którego zakładzie pracy występują szkodliwe dla zdrowia pyły, jest obowiązany do dokonywania badań i pomiarów stężeń pyłów [4].

Zapylenie powietrza w kopalniach stwarza dwa niebezpieczeństwa. Pierwsze to zagrożenie wybuchem pyłu węglowego, a drugie to zagrożenie dla zdrowia pracownika.

Pierwszym krokiem profilaktyki stosowanej w ochronie zdrowia pracowników jest podjęcie środków organizacyjnych i technicznych [3, 5]. Drugi krok profilaktyki na rzecz ochrony zdrowia to środki ochrony zbiorowej [3, 5, 6]. Jako trzeci krok zwalczania zagrożenia stosuje się środki ochrony indywidualnej. Pracownicy zatrudnieni na stanowiskach pracy, gdzie mimo podjęcia pierwszych dwóch kroków profilaktyki występują przekroczenia NDS zapylenia, są zobligowani do stosowania półmasek filtrujących o właściwej klasie ochrony układu oddechowego zakwalifikowanych na danym stanowisku pracy [3, 5].

6.2. Pyły – źródła emisji pyłów oraz ich wpływ na organizm człowieka

Pyłem nazywa się cząsteczki emitowane do środowiska podczas różnego rodzaju naturalnych lub sztucznych procesów pyłotwórczych [1].

Do naturalnych źródeł pyłu zalicza się: wybuchy wulkanów, pożary lasów, pyły roślin, mikroorganizmy czy erozja gleby. Natomiast sztuczne to te wytwarzane przez przemysł, np. górniczy, budowlany, energetyczny, chemiczny itp. [1].

Główne źródła zapylenia powietrza kopalnianego to [7]:

- urabianie calizny węglowej w ścianach za pomocą kombajnów,
- drażnienie wyrobisk korytarzowych,
- rozdrabnianie i transport urobku,
- przesuwanie sekcji obudów zmechanizowanych.

Pyły szkodliwe można podzielić ze względu na rodzaj działania biologicznego i szkodliwego dla człowieka na pyły o działaniu [3]:

- drażniącym (cząstki węgla, żelaza, szkła, aluminium, związku baru itp.),

- zwłókniającym (cząstki kwarcu, krystobalitu, trydymitu, azbestu, talku, kaolinu, pyły rud żelaznych i pył węglowy),
- kancerogennym (azbest, ogniotrwałe włókna ceramiczne do specjalnych celów),
- alergizującym (pyły pochodzenia roślinnego, zwierzęcego, leki, pyły arsenu, miedzi, cynku, chromu).

Układ oddechowy człowieka można podzielić na kilka obszarów czynnościowych, które istotnie różnią się między sobą pod względem czasu zatrzymania pyłu w miejscach osadzania, szybkością i drogami jego eliminacji, a także reakcją patologiczną na pył. Najważniejsze z nich to [8]:

- obszar górnych dróg oddechowych (nos, jama ustna, gardło, krtań),
- obszar tchawiczno-oskrzelowy (tchawica, oskrzela, oskrzeliki),
- obszar wymiany gazowej (pęcherzyki płucne). Zaleganie pyłu w każdym z tych obszarów jest uzależnione od wymiaru jego cząstek, budowy dróg oddechowych i samego procesu oddychania.

Ze względu na skutki zdrowotne najgroźniejsze są cząstki frakcji respirabilnej, umożliwiającej ich przeniknięcie do obszaru wymiany gazowej i w konsekwencji prowadzące do możliwości rozwoju pylicy płuc, większości nowotworów oraz zapalenia pęcherzyków płucnych. Rodzaj choroby wywołanej oddziaływaniem pyłu na układ oddechowy zależy od rodzaju wdychanego pyłu. Narażenie na cząstki pyłów zawierających wolną krystaliczną krzemionkę może być przyczyną krzemicy. Wdychanie pyłów włóknistych może prowadzić do pylicy płuc i nowotworów. Narażenie na cząstki pyłów drewna twardego (buk, dąb) może być powodem nowotworów nosa i zatok przynosowych [8].

Pylica płuc jest chorobą związaną z narażeniem na pyły o działaniu zwłókniającym i zawsze jest chorobą zawinioną przez warunki pracy. Jest chorobą nieuleczalną i może postępować nawet mimo ustania kontaktu z czynnikiem ją wywołującym – pyłem. Ryzyko zachorowania na tę chorobę jest ściśle związane z zapyleniem powietrza w środowisku pracy, które przekracza wartości dopuszczalne. Za stan zapylenia na stanowiskach pracy odpowiada w całości pracodawca, który musi stworzyć jak najkorzystniejsze warunki do pracy podległych mu załóg górniczych. Pylica płuc powoduje istotne skutki zdrowotne oraz generuje koszty związane z profilaktyką i leczeniem pracowników chorych bądź zagrożonych pylicą płuc. Celem nadrzędnym kierownictwa kopalni powinno być dołożenie wszelkich starań, aby ograniczyć do minimum ryzyko zachorowania oraz poprawić komfort pracy załóg górniczych [8, 9].

6.3. Opis rejonu analizowanej ściany oraz pobór próbek pyłu szkodliwego dla zdrowia

Ściana „Y” w pokładzie „Z” prowadzona jest w kierunku z zachodu na wschód, systemem podłużnym z zawałem stropu na wysokość do 3,0 m. Rozciągłość warstw w rejonie ma kierunek południowo-zachodni – północno-wschodni, a upad warstw oscyluje w granicach 2°–16°. Pokład w parceli ściany zalega od -468,0 m n.p.m. do -509 m n.p.m.

Długość ściany „Y” wynosi od 158 do 165 m. Nachylenie podłużne waha się od 5° do 14°, a nachylenie poprzeczne jest w granicach od 0° do 7°. Ściana „Y” w pokładzie „Z” przewietrzana jest sposobem na „U” wznoszącym prądem powietrza. Chodniki przyścianowe likwidowane są przez rabunek i zawał skał stropowych za linią zawału ściany do 6 m. W razie konieczności linię likwidacji wyrobisk uszczelnia się piankami stosowanymi w górnictwie [10].

W rejonie ściany zatrudnionych jest około 86 osób, z czego 41 to średnia liczba osób naocznie narażonych na oddziaływanie czynników szkodliwych (w tym pyłów). Średnia wartość zachorowań na pylice dla oddziały w okresie 5-letnim wynosi 0,2 na 100 zatrudnionych.

Pobieranie próbek na stanowiskach pracy przeprowadzono na podstawie Polskich Norm: PN-Z-04008-7:2002 „Ochrona czystości powietrza – Pobieranie próbek – Zasady pobierania próbek powietrza w środowisku pracy i interpretacji wyników” oraz PN-G-04035:2002+Az1:2005 „Ochrona czystości powietrza w podziemnych zakładach górniczych. Pomiar stężeń zapylenia powietrza oraz oznaczenie zawartości wolnej krystalicznej krzemionki w pyłe” [11, 12].

Do pobrania próbek pyłu użyto metody dozymetrii indywidualnej, stosując pompki indywidualne, które umożliwiają pobór próbek powietrza w strefie oddychania pracownika. Do pomiarów stężenia pyłów na stanowisku pracy kombajnisty ścianowego zastosowane zostały aspiratory indywidualne typu 224-43EX firmy SKC, które za każdym razem przed i po pomiarze podlegają sprawdzeniu rotametrem ROS-06 oraz pyłomierze grawimetryczne CIP-10 firmy ARELCO, które sprawdzane są okresowo rotametrem typu ROS-10.

6.4. Procedura oceny ryzyka zdrowotnego związanego ze szkodliwym oddziaływaniem pyłu węglowego na człowieka

Na stanowiskach pracy należy przeprowadzać proces oceny ryzyka zdrowotnego, który składa się z następujących etapów [5, 7]:

- sprawdzenie, jakie zagrożenia występują na stanowisku pracy i dokonanie ich oceny pod względem wpływu na organizm człowieka,
- identyfikacja narażeń oraz charakterystyka wpływu na człowieka, z której wynika, że działanie pyłów na organizm ludzki może być przyczyną mechanicznego uszkodzenia błon śluzowych lub skóry, a także niebezpiecznych wśród górników chorób płuc (pylica i krzemica), które zaliczane są do chorób zawodowych,
- dokonanie pomiarów stężeń czynników szkodliwych w obszarze wykonywanej pracy,
- szacowanie ryzyka narażenia i występujące straty,
- podjęcie działań profilaktycznych minimalizujących ryzyko wystąpienia strat lub eliminujących narażenie oraz zapewnienie niezbędnych nakładów na realizację działań.

Dokonanie pomiarów stężeń pyłów szkodliwych dla zdrowia polega na pobraniu prób powietrza na stanowisku pracy oraz analizie substancji szkodliwych, takich jak stężenie pyłu w powietrzu i zawartości krzemionki w pyłe. Stężenie pyłu określa się na podstawie dwóch wzorów, rozdzielając na:

- frakcję respirabilną:

$$C_r = \frac{m_r}{V}, \quad (6.1)$$

- frakcję wdychalną:

$$C_c = \frac{m_c}{V}, \quad (6.2)$$

gdzie:

C_r – stężenie frakcji respirabilnej $[\frac{\text{mg}}{\text{m}^3}]$,

C_c – stężenie frakcji wdychalnej $[\frac{\text{mg}}{\text{m}^3}]$,

m_r – masa pyłu frakcji respirabilnej [mg],

m_c – masa frakcji wdychalnej [mg],

V – objętość zassanej próbki powietrza [m^3].

Zawartość wolnej krzemionki w pyłe określa się na podstawie badań laboratoryjnych i wyraża w procentach [%].

Najwyższe dopuszczalne stężenie (NDS) pyłowych czynników szkodliwych dla zdrowia w środowisku pracy określa Rozporządzenie Ministra Rodziny, Pracy i Polityki Społecznej z dnia 12 czerwca 2018 roku w sprawie najwyższych dopuszczalnych stężeń i natężeń czynników szkodliwych dla zdrowia w środowisku [2].

W celu zwiększenia bezpieczeństwa pracy, ograniczenia zachorowalności i wypadków w pracy, niezbędna jest prawidłowa ocena ryzyka zawodowego na danym stanowisku pracy. Wyróżnia się dwa podstawowe przejawy ryzyka zawodowego: ryzyko zagrożeniowe, tj. straty ludzkie i materialne spowodowane niebezpiecznymi warunkami pracy oraz ryzyko zdrowotne, czyli ewentualne skutki powstałe w wyniku oddziaływania czynników szkodliwych [7].

Procedura szacowania ryzyka zdrowotnego polega na [7]:

- ocenie zgodności NDS z warunkami pracy,
- przyjęciu kryterium oceny ryzyka,
- wyznaczeniu wskaźnika ryzyka,
- interpretacji wskaźnika ryzyka.

Procedura ta różni się od innych tym, że ocena nie kończy się wykazaniem przekroczenia norm, ale uwzględnia takie parametry jak: wskaźnik wystąpienia ryzyka zagrożenia, wskaźnik ryzyka ekspozycji zagrożenia, wskaźnik ryzyka liczby zagrożonych osób oraz wskaźnik ryzyka strat powstałych w wyniku zagrożenia. Dzięki temu można przewidzieć prawdopodobne skutki narażenia na danym stanowisku pracy oraz dobrać odpowiednią profilaktykę.

Ocena zgodności NDS z warunkami pracy:

Stężenie pyłu na stanowisku pracy obliczamy na podstawie wzorów dla pobranych prób, dla:

- średniego stężenia frakcji wdychalnej:

$$C_c = \frac{\sum_{i=1}^n C_{ic} * t_{ic}}{\sum_{i=1}^n t_i}, \quad (6.3)$$

- średniego stężenia frakcji respirabilnej:

$$C_r = \frac{\sum_{i=1}^n C_{ir} * t_{ir}}{\sum_{i=1}^n t_i}, \quad (6.4)$$

gdzie:

C_c – średnie stężenie frakcji wdychalnej na stanowisku pracy $\left[\frac{\text{mg}}{\text{m}^3} \right]$,

C_r – średnie stężenie frakcji respirabilnej na stanowisku pracy $\left[\frac{\text{mg}}{\text{m}^3}\right]$,

$C_{ic/r}$ – stężenie frakcji wdychalnej lub respirabilnej w danej próbie,

t_i – czas pobierania próbek [s],

n – liczba pobranych próbek.

- średniego stężenia pyłu podczas całej zmiany roboczej:

$$C_{W_{c/r}} = \frac{C_{c/r} * \sum_{i=1}^n t_i}{t_z}, \quad (6.5)$$

gdzie:

$C_{W_{c/r}}$ – średnie stężenie frakcji wdychalnej lub respirabilnej na stanowisku pracy podczas całej zmiany roboczej, która została obliczona na podstawie pomiarów indywidualnych $\left[\frac{\text{mg}}{\text{m}^3}\right]$,

t_z – czas zmiany roboczej [480 min].

Przyjęcie kryterium oceny ryzyka

Dla przyjęcia kryterium przeprowadza się ocenę:

- a) możliwości wystąpienia zagrożenia:

$$W_{P_{c/r}} = \frac{C_{W_{c/r}}}{\text{NDS}}, \quad (6.6)$$

gdzie:

$W_{P_{c/r}}$ – wskaźnik ryzyka przekroczenia NDS.

Do dalszych obliczeń zawsze bierze się pod uwagę większą wartość wskaźnika ryzyka przekroczenie NDS, korzystając z tabeli 6.1.

Tabela 6.1

Wskaźnik wystąpienia ryzyka zagrożenia (P)

Ocena możliwości wystąpienia zagrożenia	Zakres	Wskaźnik wystąpienia ryzyka zagrożenia (P)
Pewne	$W_{P_{c/r}} > 6$	10
Bardzo prawdopodobne	$3 < W_{P_{c/r}} \leq 6$	6
Prawdopodobne	$1 < W_{P_{c/r}} \leq 3$	3
Możliwe	$0,5 < W_{P_{c/r}} \leq 1$	1
Małe	$0,2 < W_{P_{c/r}} \leq 0,5$	0,5
Praktycznie niemożliwe	$W_{P_{c/r}} \leq 0,2$	0,2

b) ekspozycji na zagrożenie:

$$W_E = W_{Pc/r} \frac{L_g}{L_{gr}}, \quad (6.7)$$

gdzie:

W_E – wskaźnik ryzyka wchłonięcia szkodliwej dawki pyłu przez pracownika na stanowisku pracy,

L_g – średnia liczba przepracowanych godzin w narażeniu przez osobę pracującą w oddziale w ciągu roku [godz.],

L_{gr} – liczba godzin dla tygodniowego rejestru pracy w ciągu roku [2184 godz.],

Tabela 6.2

Wskaźnik ryzyka ekspozycji zagrożenia (E)

Ekspozycja	Zakres	Wskaźnik ryzyka ekspozycji zagrożenia (E)
Stała	Przez całą zmianę każdego dnia pracy $W_E \geq 1$	10
Częsta	Raz lub więcej razy/dobę $0,6 \leq W_E < 1$	6
Sporadyczna	Raz lub więcej razy/tydzień $0,4 \leq W_E < 0,6$	4
Okazjonalna	Raz lub więcej razy/miesiąc $0,2 \leq W_E < 0,4$	2
Minimalna	Kilka razy w roku $0,1 \leq W_E < 0,2$	1
Znikoma	Raz do roku $W_E < 0,1$	0,5

c) liczby osób podatnych na zagrożenie:

$$W_L = \frac{L_N}{L_{AZ}}, \quad (6.8)$$

gdzie:

W_L – wskaźnik ryzyka narażenia określonej liczby osób w oddziale,

L_N – średnia liczba osób narażonych na oddziaływanie czynników szkodliwych w oddziale [szt.],

L_{AZ} – liczba zatrudnionych pracowników w oddziale [szt.],

Tabela 6.3

Wskaźnik ryzyka liczby zagrożonych osób (L)

Procentowa liczba osób narażonych [%]	Zakres	Wskaźnik ryzyka liczby zagrożonych osób (L)
81- 100	$0,8 < W_L \leq 1,00$	10
60- 80	$0,6 < W_L \leq 0,8$	8
41- 60	$0,4 < W_L \leq 0,6$	6
21- 40	$0,2 < W_L \leq 0,4$	4
11- 20	$0,1 < W_L \leq 0,2$	2
1- 10	$W_L \leq 0,1$	1

d) potencjalnych skutków zagrożenia:

$$W_S = W_Z * L_N = \frac{L_{CH}}{L_{ZAT}} * L_N, \quad (6.9)$$

gdzie:

W_S – wskaźnik ryzyka wystąpienia strat w oddziale,

W_Z – zachorowalność pracowników w oddziale,

L_{CH} – średnia wartość zachorowań na pylice w danym oddziale w 5-letnim okresie,

L_{ZAT} – średnia liczba zatrudnionych osób w danym oddziale w 5-letnim okresie.

Tabela 6.4

Wskaźnik ryzyka strat powstałych w wyniku zagrożenia (S)

Strata	Zakres	Wskaźnik ryzyka strat (S)
Katastrofalna	Pełna niezdolność do pracy wielu pracowników lub śmierć przynajmniej jednego pracownika $W_S \geq 1$	10
Krytyczna	Pełna niezdolność do pracy $0,6 \leq W_S < 1$	6
Ciężka	Zmiana stanowiska pracy podyktowana poważnymi zmianami chorobowymi $0,3 \leq W_S < 0,6$	3
Duża	Długotrwała choroba $0,1 \leq W_S < 0,3$	1
Niewielka	Krótkotrwała choroba $0,05 \leq W_S < 0,1$	0,5
Pomijana	Niewielkie dolegliwości $W_S < 0,05$	0,1

Wyznaczenie wskaźnika ryzyka

Wskaźnik ryzyka zdrowotnego związanego z zapyleniem powietrza ustala się przez iloczyn składowych kryterium oceny ryzyka:

$$W_{RZ} = P * E * L * S, \quad (6.10)$$

gdzie:

W_{RZ} – wskaźnik ryzyka zdrowotnego,

P – wskaźnik ryzyka wystąpienia zagrożenia,

E – wskaźnik ryzyka ekspozycji zagrożenia,

L – wskaźnik ryzyka liczby osób zagrożonych,

S – wskaźnik ryzyka strat powstałych w wyniku zagrożenia.

Interpretacja wskaźnika ryzyka

Po obliczeniu wskaźnika ryzyka zdrowotnego W_{RZ} pracodawca zalicza dane stanowisko pracy do jednej ze stref ryzyka. Tabela 6.5 przedstawia strefy ryzyka.

Tabela 6.5

Wartości wskaźnika ryzyka i rodzaje stref ryzyka

Wartość wskaźnika [W_{RZ}]	Kategoria ryzyka	Strefa ryzyka i zalecenia decyzyjne
Poniżej 50	Minimalne	Strefa bezpieczna. Strefa ta obejmuje te stanowiska pracy, które charakteryzują się najmniejszym ryzykiem zdrowotnym pracownika. W tym przypadku profilaktyka nie jest stosowana, a pomiary czynników szkodliwych dla zdrowia przeprowadza się raz w ciągu 24 miesięcy.
$50 \leq W_{RZ} < 300$	Akceptowalne	Strefa prawie bezpieczna. Strefa ta obejmuje stanowiska pracownicze, które cechują się ryzykiem akceptowalnym. Wprowadza się działania profilaktyczne w zakresie ochrony indywidualnej i skraca się czas wykonywania pomiarów do 12 miesięcy.
$300 \leq W_{RZ} < 900$	Istotne	Strefa niebezpieczna. W tej strefie ryzyko ma charakter istotny. Należy w przedziale czasowym od kwartału do pół roku zredukować poziom ryzyka do akceptowalnego. Należy zastosować profilaktykę, która obniży poziom ryzyka (zastosowanie skutecznej ochrony indywidualnej i zbiorowej). Pomiary będą wykonywane raz na 6 miesięcy.
$900 \leq W_{RZ} < 1800$	Niepożądane	Strefa szczególnie niebezpieczna. Na stanowiskach pracy występuje ryzyko, które nie jest pożądane. W żadnym wypadku nie wolno rozpocząć pracy w takich warunkach. Jeżeli praca jest już wykonywana, wówczas należy zredukować ryzyko w okresie do 3 miesięcy. Pomiar czynników szkodliwych na organizm człowieka są wykonywane systemem ciągłym.
Powyżej 1800	Nieakceptowalne	Strefa krytyczna. Ryzyko występujące na danym stanowisku pracy nie jest do zaakceptowania. Praca nie może być rozpoczęta, a w przypadku prac już wykonywanych powinny być one natychmiast zatrzymane. Warunkiem wznowienia prac na stanowisku jest zredukowanie ryzyka.

6.5. Ocena ryzyka zdrowotnego związanego z zapyleniem na stanowisku kombajnisty ścianowego

Pomiary zanieczyszczenia powietrza pyłem kopalnianym wykonano w Kopalni Węgla Kamiennego "X", na ścianie „Y” w pokładzie „Z”. W danym rejonie wydobywczym pracuje oddział G-3-B. Załoga oddziału pracuje w czterozmianowym trybie pracy:

- zmiana „A” – od godz. 6.30 do 14.00,
- zmiana „B” – od godz. 12.30 do 20.00,

- zmiana „C” – od godz. 18.30 do 2.00,
- zmiana „D” – od godz. 0.30 do 8.00.

Próby pobierane były na zmianie porannej (zmiana „A”). Tabela 6.6 przedstawia harmonogram pracy na stanowisku kombajnisty [5].

Tabela 6.6

Harmonogram pracy na stanowisku kombajnisty

Czas wykonywanej pracy	Wykonywana czynność
6 ³⁰ – 7 ⁰⁰	Zjazd załogi szybem na poziom 840 m
7 ⁰⁰ – 8 ⁰⁰	Przejazd pociągiem osobowym + dojście na stanowiska pracy + rozpoczęcie wydobywania
8 ⁰⁰ – 11 ⁰⁰	Prace związane z obsługą kombajnu ścianowego KSW-880EU + przerwy technologiczne
11 ⁰⁰ – 13 ¹⁵	Prace związane z obsługą kombajnu ścianowego KSW-880EU
13 ¹⁵ – 14 ⁰⁰	Wyjście załogi z rejonu + przejazd pociągiem osobowym
14 ⁰⁰ – 14 ³⁰	Wyjazd szybem załogi na powierzchnie

Dla każdej czynności, wykonywanej w czasie zmiany roboczej, pobrano jedną próbkę powietrza w strefie oddychania pracownika [13]. Wyniki przedstawia tabela 6.7.

Tabela 6.7

Wyniki pomiarów na stanowisku kombajnisty ścianowego

Czynność	Stężenie $C_i \left[\frac{mg}{m^3} \right]$		Czas poboru $t_i [min]$
	Frakcji respirabilnej C_r	Frakcji wdychalnej C_c	
Przejazd pociągiem osobowym + dojście na stanowiska pracy + rozpoczęcie wydobywania	10,2	28,6	60
Prace związane z obsługą kombajnu ścianowego KSW-880EU + przerwy technologiczne	16,3	50,7	180
Prace związane z obsługą kombajnu ścianowego KSW-880EU	19,1	55,3	135
Wyjście załogi z rejonu + przejazd pociągiem osobowym	11,2	29,0	45

Załoga oddziału podczas takich czynności jak zjazd i wyjazd z poziomu jest w znikomym stopniu narażona na oddziaływanie szkodliwych pyłów w powietrzu, dlatego do obliczeń przyjęto, że $C_i = 0$.

Obliczenia dla średniego stężenia frakcji wdychalnej na stanowisku pracy:

$$C_c = \frac{0 * 30 + 28,6 * 60 + 50,7 * 180 + 55,3 * 135 + 29 * 45 + 0 * 30}{420} \left[\frac{mg}{m^3} \right]$$

$$C_c = 46,69 \left[\frac{mg}{m^3} \right]$$

Obliczenia dla średniego stężenia frakcji respirabilnej na stanowisku pracy:

$$C_r = \frac{0 * 30 + 10,2 * 60 + 16,3 * 180 + 19,1 * 135 + 11,2 * 45 + 0 * 30}{420} \left[\frac{mg}{m^3} \right]$$

$$C_r = 15,78 \left[\frac{mg}{m^3} \right]$$

Obliczenia dla średniego stężenia frakcji respirabilnej i wdychalnej podczas całej zmiany roboczej:

$$C_{wc} = \frac{0 * 30 + 28,6 * 60 + 50,7 * 180 + 55,3 * 135 + 29 * 45 + 0 * 30}{480} \left[\frac{mg}{m^3} \right]$$

$$C_{wc} = 40,85 \left[\frac{mg}{m^3} \right]$$

$$C_{wr} = \frac{0 * 30 + 10,2 * 60 + 16,3 * 180 + 19,1 * 135 + 11,2 * 45 + 0 * 30}{480} \left[\frac{mg}{m^3} \right]$$

$$C_{wr} = 13,81 \left[\frac{mg}{m^3} \right]$$

W badaniu stwierdzona zawartość krzemionki krystalicznej wyniosła $0,408 \left[\frac{mg}{m^3} \right]$.

NDS krzemionki frakcji respirabilnej to $0,1 \left[\frac{mg}{m^3} \right]$.

Szkodliwe działanie kwarcu i krystobalitu na organizm człowieka jest przede wszystkim związane z długotrwałym – ponad 10-letnim – wdychaniem pyłu, który może przedostawać się do obszaru wymiany gazowej w płucach i tam działać toksycznie na: makrofagi, pneumocyty i inne komórki, wywołując przewlekłą reakcję zapalną, a następnie zmiany zwłóknieniowe o charakterze ogniskowym (guzkowym) lub rozproszonym. Skutkiem takich procesów jest rozwój krzemowej pylicy płuc, a w wielu przypadkach także raka płuca. Innymi skutkami zdrowotnymi narażenia są: choroby autoimmunizacyjne, przewlekłe choroby nerek, bakteryjne i grzybicze powikłania krzemicy oraz krzemica ogólnoustrojowa. W badaniach epidemiologicznych osób narażonych na krystaliczną krzemionkę wykazano, że ryzyko rozwoju krzemicy jest proporcjonalne do dawki pyłu i po 40–45 latach narażenia wynosi: 2–3% w przypadku stężenia na poziomie $0,025 \text{ mg/m}^3$ oraz od kilku do kilkunastu procent, gdy stężenie wynosi $0,05 \text{ mg/m}^3$ i od kilku do około 70% w przypadku stężenia $0,1 \text{ mg/m}^3$ [14].

Dla przyjęcia kryterium oceny wykonuje się:

a) Obliczenia możliwości wystąpienia zagrożenia:

- frakcji respirabilnej (NDS=2)

$$W_{P_r} = \frac{13,81}{2}$$

$$W_{P_r} = 6,91$$

Według wskaźnika ryzyka występowania zagrożenia (tabela 6.1) zakres możliwości wystąpienia zagrożenia mieści się w przedziale $W_{P_{c/r}} > 6$, dlatego przyjmujemy wartość $P_r = 10$,

- frakcji wdychalnej (NDS=10)

$$W_{P_c} = \frac{40,85}{10}$$

$$W_{P_c} = 4,09$$

Według wskaźnika ryzyka występowania zagrożenia (tabela 6.1) zakres możliwości wystąpienia zagrożenia mieści się w przedział $3 < W_{P_{c/r}} \leq 6$, dlatego przyjmujemy wartość $P_c = 6$

Przy obliczaniu wskaźnika ryzyka zdrowotnego bierze się pod uwagę najwyższą wartość $W_{P_{c/r}}$.

b) Obliczenia ekspozycji na zagrożenia:

$$W_E = 6,91 * \frac{1980}{2184}$$

$$W_E = 6,26$$

Według wskaźnika ryzyka ekspozycji zagrożenia (tabela 6.2) otrzymana wartość mieści się w zakresie $W_E \geq 1$, dlatego przyjmuje się wskaźnik $E=10$.

c) Obliczenia liczby pracowników podatnych na zagrożenie:

$$W_L = \frac{41}{86}$$

$$W_L = 0,48$$

Wskaźnik ryzyka liczby zagrożonych osób (tabela 6.3) mieści się w zakresie $0,4 < W_L \leq 0,6$, dlatego przyjmuje się wskaźnik $L = 6$.

d) Obliczenia potencjalnych skutków zagrożenia:

$$W_S = \frac{0,2}{100} * 41$$

$$W_S = 0,08$$

Wskaźnik ryzyka strat powstałych w wyniku zagrożenia (tabela 6.4) mieści się w zakresie $0,05 \leq W_S < 0,1$, przyjmuje się zatem wskaźnik $S = 0,5$.

Mając powyższe dane cząstkowe, wyznacza się wskaźnik ryzyka zdrowotnego związanego z zapyleniem na stanowisku kombajnisty ścianowego w ścianie „Y” pokład „Z” przez obliczenia:

$$W_{RZ} = 10 * 10 * 6 * 0,5$$

Na podstawie pomiarów, obliczeń stężeń i dokonanego wyznaczenia wskaźnika ryzyka zdrowotnego na stanowisku kombajnisty ścianowego w ścianie „Y” w pokładzie „Z” wartość wyznaczonego wskaźnika ryzyka wyniosła $W_{RZ} = 300$. Określa ona:

- kategorię ryzyka – ryzyko zdrowotne kombajnisty w ścianie „Y” zaliczane jest do kategorii „istotne”,
- strefę ryzyka – niebezpieczna,
- zalecenia decyzyjne – zaleca się obniżenie ryzyka do poziomu akceptowalnego w okresie 3–6 miesięcy. Biorąc pod uwagę aspekt ekonomiczny, należy zastosować skuteczne środki profilaktyczne lub ochronne, które w krótkim czasie zmniejszą poziom ryzyka. Pomiary czynników przeprowadza się raz na pół roku.

Zdecydowanie stanowisko kombajnisty ścianowego jest obarczone wysokim ryzykiem zdrowotnym. Każdy pracownik na tym stanowisku powinien być świadomy podejmowanego ryzyka, mieć wyobrażenie o skutkach chorobowych i we własnym interesie dbać o ochronę zbiorową i indywidualną w czasie pracy. Kombajnista powinien zadbać o prawidłowe działanie zraszaczy na organie urabiającym, za których przegląd jest odpowiedzialny przed każdą rozpoczętą zmianą.

6.6. Profilaktyka w celu ochrony przed zagrożeniem pyłowym

Zapylenie powietrza w kopalniach stwarza dwa niebezpieczeństwa. Pierwsze to zagrożenie wybuchem pyłu węglowego, a drugie to zagrożenie dla zdrowia pracownika.

Pierwszym krokiem profilaktyki stosowanej w ochronie zdrowia pracowników jest podjęcie środków organizacyjnych i technicznych. Zalicza się do nich [3, 5]:

- wykonanie pomiarów czynników szkodliwych dla zdrowia na stanowiskach pracy przez akredytowane laboratoria,
- rejestracja danych pracowników pracujących w środowisku zagrożenia pyłami szkodliwymi dla zdrowia, którzy zobligowani są do używania środków ochrony indywidualnej,

- sporządzanie zestawień (miesięcznych i rocznych) stężeń pyłów i dni przepracowanych dla każdego pracownika na stanowiskach, gdzie przekraczane jest NDS,
- dobór środków ochrony indywidualnej na podstawie wyników pomiarów akredytowanych jednostek badawczych,
- szkolenia i informowanie pracowników o wartościach stężeń pyłu na stanowisku pracy,
- egzekwowanie od pracowników stosowania środków ochrony zbiorowej i indywidualnej o odpowiedniej klasie ochrony,
- rotacja pracowników na stanowiskach pracy.

Drugi krok profilaktyki na rzecz ochrony zdrowia to środki ochrony zbiorowej [3, 5, 6]:

- stosowanie urządzeń zraszających na maszynach urabiających (kombajny ścienne i chodnikowe), a w mediach zastosowanie środków chemicznych obniżających napięcie powierzchniowe wody,
- stosowanie urządzeń zraszających w miejscach przesypu urobku na trasach przenośników taśmowych i zgrzebłowych,
- stosowanie odpylaczy przy wentylacji odrębnej,
- płukanie otworów podczas prac wiertniczych,
- zmywanie wyrobisk wodą, gdzie prowadzone są roboty strzałowe.

Jako trzeci krok zwalczania zagrożenia stosuje się środki ochrony indywidualnej. Pracownicy zatrudnieni na stanowiskach pracy, gdzie mimo podjęcia pierwszych dwóch kroków profilaktyki występują przekroczenia NDS zapylenia są zobligowani do stosowania półmasek filtrujących o właściwej klasie ochrony układu oddechowego zakwalifikowanych na danym stanowisku pracy. Dobór środków ochrony indywidualnej dokonywany jest na podstawie pomiarów stężeń pyłów szkodliwych dla zdrowia człowieka. Pracownicy w kopalni są zobligowani do bezwzględnego stosowania indywidualnego sprzętu filtrującego o odpowiedniej klasie ochronnej w czasie zmiany roboczej, od momentu wejścia w rejon eksploatacyjny do wyrobisk, gdzie prowadzony jest transport urobku i w wyrobiskach z zużytym prądem powietrza [3, 5].

6.7. Podsumowanie

Według opublikowanych danych WUG [15] stwierdzono, że w ostatnich 5 latach pylica płuc była najczęściej stwierdzaną chorobą zawodową w górnictwie. Z przeprowadzonych badań wynika, że prawie 87% stwierdzonych chorób zawodowych to udział pylicy płuc. Analizując lata poprzednie zachorowalności na pylicę płuc wśród górników, można zauważyć znaczący spadek liczby chorób wśród górników węgla kamiennego. Taki stan rzeczy bierze się z coraz większej świadomości zagrożenia, jakim jest zapylenie w miejscu pracy i konsekwencjami, jakie mogą z tego wynikać w kolejnych latach życia. Zmienia się świadomość ludzi, styl życia, co ma duży wpływ na zdrowie. Również stosowanie się do zaleceń BHP, w perspektywie wieloletniej, może uratować nie jednemu górnikowi życie. Dlatego tak ważne jest stosowanie środków ochrony zdrowia – zbiorowych i indywidualnych [15].

Pylica płuc to przewlekła choroba. Pojawia się późno, po wielu latach pracy (nawet 10–20), rozwija się stopniowo i nieodwracalnie. Spowodowana jest wdychaniem pyłu węglowego z domieszką dwutlenku krzemu SiO_2 . Objawy towarzyszące chorobie to niewydolność oddechowa, krążenia, nadciśnienie, duszności, kaszel, rozedma i przewlekłe zapalenia oskrzeli [9].

Podstawowym obowiązkiem pracodawcy jest dokonanie oceny ryzyka zawodowego, której podstawą jest zidentyfikowanie wszystkich zagrożeń występujących na stanowisku pracy. Jeżeli na stanowisku pracy występują pyły, to należy: ustalić rodzaj występującego pyłu, sprawdzić czy dla zidentyfikowanego pyłu ustalona jest wartość NDS, zlecić właściwemu laboratorium przeprowadzenie pomiarów stężeń pyłu, ustalić poziom narażenia pracowników, ocenić ryzyko zawodowe i podjąć działanie w celu jego ograniczenia. Pracodawca przez dokonywanie oceny ryzyka i wprowadzenie środków prewencyjnych powinien ograniczać narażenie pracowników do możliwie najmniejszego. Ryzyko można ograniczać przez działania techniczne i organizacyjne.

W pracy przeprowadzona została analiza i obliczenia oceny ryzyka zdrowotnego związanego z zapyleniem na stanowisku kombajnisty ścianowego. Na podstawie pomiarów stężeń, obliczeń i dokonanego wyznaczenia wskaźnika ryzyka zdrowotnego dla stanowiska kombajnisty w ścianie wynika, iż owe ryzyko zaliczone jest do strefy niebezpiecznej i charakteryzuje się jako istotne. W związku z tym należy podjąć działania profilaktyczne związane z redukcją zanieczyszczenia powietrza pyłami, aby zminimalizować ryzyko, co najmniej do strefy akceptowalnej.

W ścianie „Y” w pokładzie „Z” zastosowano następującą profilaktykę w celu obniżenia zapylenia, zagrożenia wybuchem pyłu węglowego i działania pyłów szkodliwych dla zdrowia człowieka:

- środki ochrony zbiorowej, takie jak: zastosowanie zraszania na maszynach urabiających, przesypach, wysypach wraz ze środkami chemicznymi zmniejszającymi napięcie powierzchniowe wody, harmonogram kontroli sprawności urządzeń pozbawiających pył lotności, wdrożenie technologii pracy minimalizującej gromadzenie się pyłu, szkolenia bhp uświadamiające ryzyko wystąpienia zagrożenia,
- środki ochrony indywidualnej, w tym: stosowanie półmasek jedнокrotnego i wielokrotnego użytku, indywidualne szkolenia bhp na stanowisku pracy.

Bibliografia

1. Gromiec J.: Pomiary i ocena stężeń czynników chemicznych i pyłów w środowisku pracy – wytyczne i zalecenia. Wyd. CIOP-PIB, Warszawa 2004.
2. Rozporządzenie Ministra Rodziny, Pracy i Polityki Społecznej z dnia 12 czerwca 2018 r. w sprawie najwyższych dopuszczalnych stężeń i natężeń czynników szkodliwych dla zdrowia w środowisku pracy.
3. www.pip.gov.pl.
4. Rozporządzenie Ministra Zdrowia z dnia 02.02.2011 r. w sprawie badań i pomiarów czynników szkodliwych dla zdrowia w środowisku pracy.
5. Dokument bezpieczeństwa wraz z planem ruchu zakładu górniczego „X”.
6. PN-G-04036 Zabezpieczenie przeciwybuchowe zakładów górniczych – Zabezpieczenie przed wybuchem pyłu węglowego – Oznaczanie intensywności osiadania pyłu.
7. Krause M.: Ocena ryzyka zawodowego – wymagania, wytyczne, przykłady. Organizacja i Bezpieczeństwo Pracy. Wyd. Wyższa Inżynierska Szkoła Bezpieczeństwa i Organizacji Pracy. Radom 2008.
8. Lebecki K.: Zagrożenia pyłowe w górnictwie. Wyd. GIG, Katowice 2004.
9. Marek K., Kłopotowski J.: Pylica płuc u górników węgla kamiennego i jej profilaktyka. Materiały konferencyjne: Problemy bezpieczeństwa i ochrony zdrowia w polskim górnictwie. Katowice 4–5 kwiecień 2002.
10. Projekt techniczny eksploatacji ściany „Y” w pokładzie „Z”.
11. PN-Z-04008-7:2002 Ochrona czystości powietrza – Pobieranie próbek Zasady pobierania próbek powietrza w środowisku pracy i interpretacji wyników.
12. PN-G-04035:2002+Az1:2005 Ochrona czystości powietrza w podziemnych zakładach górniczych. Pomiar stężeń zapylenia powietrza oraz oznaczenie zawartości wolnej krystalicznej krzemionki w pyłu.
13. Materiały dotyczące badanych prób powietrza udostępnione przez kopalnie.
14. Maciejewska A.: Krzemionka krystaliczna: kwarc i krystobalit – frakcja respirabilna Dokumentacja proponowanych dopuszczalnych wielkości narażenia zawodowego. Podstawy i Metody Oceny Środowiska Pracy 2014, nr 4(82), s. 67–128.

15. Raport pt.: „Ocena stanu bezpieczeństwa pracy, ratownictwa górniczego oraz bezpieczeństwa powszechnego w związku z działalnością górniczo-geologiczną w 2022 roku (porównanie od 2018 roku)”, WUG, Katowice 2023.

7. REDUKCJA ZANIECZYSZCZENIA POWIETRZA GAZAMI, SUBSTANCJAMI NIEBEZPIECZNYMI I PYŁAMI POWSTAŁYMI PRZY DRAŻNIENIU TUNELI JAKO ELEMENT PROFILAKTYKI W PROCEDURZE OCENY RYZYKA ZAWODOWEGO

7.1. Wprowadzenie

Odpowiednio dobrana profilaktyka związana z redukcją zanieczyszczenia powietrza gazami, substancjami niebezpiecznymi i pyłami powstałymi przy drażnieniu tuneli jest bardzo ważna w aspekcie zapewnienia bezpieczeństwa zatrudnionej tam załodze. Dobór profilaktyki jest możliwy dopiero po przeprowadzeniu dokładnej analizy zagrożeń (np. w ramach procedury oceny ryzyka zawodowego).

Większość dłuższych tuneli w Polsce wykonuje się metodami górniczymi. Jedną z nowocześniejszych metod jest austriacka metoda NATM, która polega na wykorzystaniu w jak największej skali efektu samonośności górotworu.

Od sierpnia 2023 roku zmianie ulegają przepisy dotyczące dopuszczalnych stężeń gazów, według których np. dopuszczalne stężenie tlenków azotu zostanie pięciokrotnie zmniejszone. Przy przewietrzaniu tuneli drażnionych metodami górniczymi mają zastosowanie głównie przepisy rozporządzenia Ministra Energii z dnia 23 listopada 2016 roku w sprawie szczegółowych wymagań dotyczących prowadzenia ruchu podziemnych zakładów górniczych. Prawidłowa wentylacja tunelu podczas jego drażenia wpływa nie tylko na bezpieczeństwo pracy, ale również na postęp robót i koszty.

W kolejnych rozdziałach przedstawiono krótką informację o tunelach i zagrożeniach występujących przy ich drażnieniu. Do oszacowania ryzyka zawodowego wybrano metodę SCORE RISC, której najważniejsze elementy zawarto w osobnym rozdziale. Dla zobrazowania zagrożeń pokazano przykładową ocenę ryzyka zawodowego na stanowisku operatora wiertnicy. Następnie wskazano pożądane działania profilaktyczne. W podsumowaniu odniesiono się do wniosków płynących z wykonanej procedury oceny i analizy ryzyka zawodowego podczas drażenia tuneli metodami górniczymi.

7.2. Tunele drażone metodami górniczymi

Tunel to budowla podziemna o charakterze liniowym, służąca do celów komunikacyjnych czy też transportowych [1]. Tunel jest budowlą, wyrobiskiem wielkogabarytowym, trudnym w wykonaniu. Występują w nim znaczne ciśnienia, pojawiające się w górotworze znajdującym się na konturze wyrobiska. Na dużej głębokości stan naprężenia i odkształcenia zbliża się do tego z obudowy szybu. Wielkość obciążenia obudowy rośnie liniowo wraz ze wzrostem średnicy oraz kwadratem ciśnienia skał, panującym na danej głębokości [2].

Drażenie tunelu może odbywać się metodami górniczymi, np. za pomocą robót strzałowych. Wyrobisko jest wykonywane segmentami, zazwyczaj najpierw stabilizowane jest obudową tymczasową. Tą metodą tunele wykonywane są na dużych głębokościach. Do najszerszej stosowanych metod górniczych należą:

- pełnego przekroju,
- podpartego sklepienia (ze sztolnią wyprzedzającą w stropie przyszłego tunelu),
- rdzenia oporowego (wielosztolniowa),
- NATM – nowa metoda austriacka.

Wprowadzenie nowych metod, technologii ma znaczący wpływ na szybkość powstawania tunelu; w dużym stopniu jest zależne od warunków geologicznych. Austriacka metoda NATM polega na wykorzystaniu w jak największej skali efektu samonośności górotworu [3].

Zasadniczą przeszkodą odnoszącą się do wszystkich metod budowy tuneli są skutki wywołane grawitacją. Najlepsza pod względem urabialności jest skała twarda. Mimo trudności w jej urabianiu ma zdolność do przeniesienia zwiększonego naprężenia, co gwarantuje stabilność wyrobiska górniczego. Skały słabe, bez powyższych cech, nie dają gwarancji stabilności wyrobiska, z uwagi na łatwość poddawania się odkształceniom [2].

7.3. Zagrożenia występujące przy drażeniu tunelu

Podczas drażenia tunelu mogą występować zagrożenia naturalne, takie jak: tąpnięcia, wyrzuty gazów i skał, wodne, siarkowodorowe czy substancjami promieniotwórczymi. W projektowanych tunelach, w skałach, gdzie stwierdzono kopaliny palne można mówić o występowaniu pożarów endogenicznych. Częściej jednak występują pożary

egzogeniczne. Przyczyn takich pożarów jest wiele, np. używanie otwartego ognia w niedozwolonych miejscach, nieprawidłowy stan techniczny środków transportu, podpalenie, niezachowywanie ostrożności podczas prac z użyciem otwartego ognia [4].

W wyniku wykonywania robót strzałowych można zmagać się z zagrożeniami spowodowanymi powstaniem niewypałów, zatruciem gazami postrzałowymi czy też rozrzutem odłamków skalnych. Można spotkać się również z niepożądanym działaniem powietrznej fali uderzeniowej i niebezpiecznych drgań parasejsmicznych [4].

W wyrobiskach, które przewietrzane są za pomocą lutniociągów może wystąpić atmosfera nienadająca się do prawidłowego procesu oddychania, z powodu [4]:

- nieprawidłowości w działaniu urządzeń wentylacyjnych,
- nieodpowiedniego stanu urządzeń wentylacyjnych,
- złego stanu maszyn napędzanych silnikami spalinowymi,
- przerwy w przewietrzaniu,
- zaistnienia pożaru.

Podczas drążenia tunelu występują czynniki szkodliwe dla zdrowia w środowisku pracy, takie jak: zapylenie, hałas, gazy postrzałowe, wibracja oraz produkty spalania paliw płynnych. Najbardziej szkodliwe czynniki dla zdrowia występują w strefach o największym natężeniu robót, czyli w przodku drążonego tunelu. Ich głównymi źródłami są: roboty wiertniczo-strzałowe, transport kołowy oraz praca maszyn roboczych [4].

Zagrożenia związane z pracą maszyn i urządzeń energomechanicznych oraz instalacji i urządzeń elektroenergetycznych zasilających zakład w energię elektryczną mogą być spowodowane niewłaściwym załadunkiem urobku i materiałów na środki transportu, nieprzestrzeganiem zasad bezpieczeństwa zawartych w regulaminie zakładu pracy, przebywaniem osób w zasięgu pracy maszyn czy też szkodliwymi substancjami zawartymi w gazach spalinowych [4].

W tym aspekcie niezwykle istotna jest profilaktyka związana z redukcją zagrożeń, w tym ze zmniejszeniem zanieczyszczenia powietrza gazami, substancjami niebezpiecznymi i pyłami powstałymi przy drążeniu tuneli.

7.4. Procedura szacowania ryzyka zawodowego metodą SCORE RISC

Metoda SCORE RISK jest przedstawiana za pomocą trzech parametrów: możliwe skutki zagrożenia, prawdopodobieństwo jego wystąpienia oraz ekspozycja na zagrożenie. Jest to metoda jakościowa, wskaźnikowa oceny ryzyka zawodowego.

Wartości poszczególnych parametrów (tab. 7.1–7.4) opisane są w różnych źródłach literaturowych m.in. przez następujących autorów: Krause M., Romanowska-Słomka I. i Słomka A. [5, 6].

W metodzie SCORE RISK wielkość ryzyka opisuje wyrażenie:

$$R = P * E * S, \quad (7.1)$$

gdzie:

R – ryzyko,

P – prawdopodobieństwo wystąpienia zagrożenia,

E – ekspozycja na zagrożenie,

S – potencjalne skutki zagrożenia.

Tabela 7.1

Szacowanie prawdopodobieństwa wystąpienia zagrożenia

Wartość P	Opis	Szansa [%]
10	bardzo prawdopodobne	50
6	całkiem możliwe	10
3	mało prawdopodobne, ale możliwe	1
1	tylko sporadycznie możliwe	10^{-1}
0,5	możliwe do pomyślenia	10^{-2}
0,2	praktycznie możliwe	10^{-3}
0,1	teoretycznie możliwe	10^{-4}

Tabela 7.2

Szacowanie ekspozycji na zagrożenie

Wartość E	Opis ekspozycji
10	stała
6	częsta/codzienna
3	sporadyczna/raz na tydzień
2	okazyjna/raz w miesiącu
1	minimalna/kilka razy w roku
0,5	znikoma/raz w roku

Tabela 7.3

Szacowanie potencjalnych skutków zagrożenia

Wartość S	Szacowane straty	Straty ludzkie	Straty materialne
100	poważna katastrofa	wiele ofiar śmiertelnych	>30 mln zł
40	katastrofa	kilka ofiar śmiertelnych	10–30 mln zł
15	bardzo duże	jedna ofiara śmiertelna	0,3–1 mln zł
7	duże	ciężkie uszkodzenia	30–300 tys. zł
3	średnie	absencja	3–30 tys. zł
1	małe	udzielenie pierwszej pomocy	<3 tys. zł

Tabela 7.4

Analiza wskaźnika ryzyka wg G.F. Kinneya i A.D. Wirutha

Wartość ryzyka R	Kategoria ryzyka	Działania zapobiegawcze
$R < 20$	Pomijalne	Wykonywanie jakichkolwiek działań nie jest konieczne
$20 < R < 70$	Akceptowalne	Kontrola nie jest potrzebna
$70 < R < 200$	Średnie	Potrzeba wykonania kontroli. Konieczność dokonania analizy kosztów oraz wymaganych efektów (należy przeprowadzać obserwację od 3 do 6 miesięcy, w tym czasie powinna nastąpić poprawa). Ryzyko powinno się zminimalizować do poziomu akceptowalnego.
$200 < R \leq 400$	Poważne	Brak możliwości rozpoczęcia działań. Należy dążyć do całkowitej redukcji ryzyka do akceptowalnego poziomu.
$R > 400$	Nieakceptowane	Wskazane wstrzymanie pracy

7.5. Ocena ryzyka zawodowego na stanowisku operatora wiertnicy

Aby przeanalizować zagrożenia występujące podczas drążenia tuneli, w ramach pracy (BK-RG/06/050/BK_22/0133) przeprowadzono ocenę ryzyka dla wszystkich stanowisk pracy związanych z bezpośrednim drążeniem tunelu.

Poniżej zamieszczono przykładową ocenę ryzyka zawodowego dla takiego stanowiska (operatora wiertnicy). Jest to pracownik zatrudniony bezpośrednio w przodku drążonego wyrobiska (rys. 7.1). Jego praca polega na drążeniu otworów w skale za pomocą urządzeń wiertniczych. Prace wiertnicze podczas drążenia tuneli często obciążone są dużym ryzykiem. W związku z powyższym operator wiertnicy powinien mieć znaczną i szeroko pojętą wiedzę z zakresu geotechniki oraz geologii, ale także materiałoznawstwa. Każdy operator wiertnicy powinien wykazywać umiejętności odpowiedniej organizacji pracy, być sumienny i dokładny, ponieważ od

prawidłowości jego działań zależy bezpieczeństwo nie tylko jego, ale też całej zatrudnionej załogi [7].

Na podstawie przeprowadzonej oceny ryzyka zidentyfikowano zagrożenia (tab. 7.5) oraz zaproponowano (przedstawione w kolejnym rozdziale) środki profilaktyki.



Rys. 7.1. Wiercenie otworów w tunelu na trasie S3 [źródło: mat. pras. GDDKiA]
Fig. 7.1. Drilling of tunnel holes on the S3 route [source: press materials GDDKiA]

Tabela 7.5

Karta oceny ryzyka zawodowego na stanowisku operatora wiertnicy

Lp.	Zagrożenie	S	E	P	R	Kategoria R
Czynnik biologiczne						
1.	Bakterie chorobotwórcze	1	6	3	18	Pomijalne
2.	Owady, gryzonie	1	6	3	18	Pomijalne
3.	Pasożyty	1	6	3	18	Pomijalne
4.	Grzyby, pleśnie	1	6	3	18	Pomijalne
Czynnik chemiczny						
1.	Substancje trujące	15	2	3	90	Średnie
2.	Substancje toksyczne	15	3	3	135	średnie
3.	Substancje rakotwórcze	15	2	3	90	Średnie
4.	Substancje radioaktywne	15	2	3	90	Średnie
5.	Substancje uczulające	15	6	1	90	Średnie
6.	Pyły	40	3	3	360	Poważne
Czynnik fizyczny						
1.	Hałas	3	6	3	54	Akceptowalne
2.	Wibracje	7	6	0,5	21	Akceptowalne

cd. tabeli 7.5

3.	Ultradźwięki	3	6	0,2	3,6	Pomijalne
4.	Promieniowanie jonizujące	3	6	0,2	3,6	Pomijalne
5.	Promieniowanie laserowe	1	2	0,1	0,2	Pomijalne
6.	Promieniowanie podczerwone nadfioletowe	1	2	0,1	0,2	Pomijalne
7.	Promieniowanie elektromagnetyczne	1	1	0,1	0,1	Pomijalne
8.	Temperatura powietrza	1	2	3	6	Pomijalne
9.	Ruch powietrza	1	1	3	3	Pomijalne
10.	Wilgotność powietrza	3	2	3	18	Pomijalne
11.	Ciśnienie	7	3	3	63	Akceptowalne
12.	Zagrożenie wentylacyjne	40	6	3	720	Nieakceptowalne
13.	Zagrożenie pożarowe	40	6	3	720	Nieakceptowalne
14.	Wybuch gazów technicznych	40	6	3	620	Nieakceptowalne
Czynnik naturalny						
1.	Zagrożenia pożarami	40	6	3	720	Nieakceptowalne
2.	Zagrożenia wodne	100	6	6	3600	Nieakceptowalne
3.	Zagrożenia tapaniami	40	6	6	1440	Nieakceptowalne
4.	Zagrożenia klimatyczne	3	6	3	54	Akceptowalne
5.	Zagrożenia wyrzutami gazów i skał	40	6	3	720	Nieakceptowalne
6.	Zagrożenia osuwiskowe	1	6	3	18	Pomijalne
7.	Zagrożenia erupcyjne	1	6	0,1	0,6	Pomijalne
8.	Zagrożenia siarkowodorowe	40	6	3	720	Nieakceptowalne
9.	Zagrożenia substancjami promieniotwórczymi	40	6	6	1440	Nieakceptowalne
Czynnik psychofizyczny						
1.	Stres	3	6	0,5	9	Pomijalne
2.	Zmęczenie pracownika	3	6	1	18	Pomijalne
3.	Szkodliwy ruch	3	6	3	54	Akceptowalne
4.	Nadmierny pośpiech	3	6	3	54	Akceptowalne
Czynnik techniczny						
1.	Przygniecenie konstrukcjami budowlanymi, rusztowaniami	3	6	1	18	Pomijalne
2.	Niedostatecznie oświetlone miejsce pracy	3	6	1	18	Pomijalne
3.	Zagrożenie uszkodzenia wzroku	7	6	3	126	Średnie
4.	Upadek na tej samej wysokości	3	2	3	18	Pomijalne
5.	Upadek z wysokości	3	3	3	27	Akceptowane
6.	Potknięcie się	3	2	3	18	Pomijalne
7.	Zagrożenie spowodowane oberwaniem się mas skalnych	7	6	1	42	Akceptowane
8.	Porażenie prądem elektrycznym	3	2	0,5	6	Pomijalne
9.	Dojazd do miejsca pracy	7	6	1	42	Akceptowane
10.	Przygniecenie przez poruszające się maszyny	3	1	1	3	Pomijalne
	Poruszające się maszyny	7	2	1	14	Pomijalne
11.	Przemieszczające się materiały	7	3	1	21	Akceptowane
12.	Ograniczenie dojścia, przejścia z uwagi na wąskie przestrzenie	1	1	0,5	0,5	Pomijalne
13.	Zagrożenie wypadkiem komunikacyjnym	15	3	1	45	Akceptowalne
14.	Ostre krawędzie	3	3	0,5	4,5	Pomijalne
15.	Odprysnięcie skał lub innych materiałów	7	6	1	42	Akceptowalne
16.	Strome wyrobiska	3	1	0,1	0,3	Pomijalne
17.	Spadające elementy	7	10	1	70	Akceptowalne
18.	Maszyny urabiające	7	3	0,2	4,2	Pomijalne
19.	Niesprawna instalacja elektryczna	7	3	0,1	2,1	Akceptowalne
20.	Uderzenie o przedmiot	1	3	3	9	Pomijalne
21.	Niedostateczna znajomość zasad bezpieczeństwa i higieny pracy	15	6	6	540	Nieakceptowalne
22.	Potknięcie na nierównym podłożu	3	2	1	6	Pomijalne
23.	Staczające się bryły kamieni, skał	3	6	0,5	9	Pomijalne
24.	Zagrożenie związane z przyciśnięciem bądź najechaniem przez środek transportu	3	2	0,2	1,2	Pomijalne

cd. tabeli 7.5

25.	Pochwycenie przez ruchome elementy	3	2	1	6	Pomijalne
26.	Wybuch środków strzelniczych	7	6	3	126	Średnie
27.	Oberwanie się skał ze stropu	15	10	6	900	Nieakceptowalne
28.	Brak uwagi	7	6	1	42	Akceptowalne
29.	Wypadnięcie z maszyny	3	3	3	27	Akceptowalne
30.	Brak ładu i porządku	3	3	3	18	Akceptowalne
31.	Stan nieprawidłowego zabudowania maszyn i urządzeń	7	3	6	126	Średnie
32.	Nieużycie ochron osobistych	15	6	6	540	Nieakceptowalne
33.	Braki w wyszkoleniu zawodowym	15	6	3	270	Poważne
34.	Brak lub niedostateczna informacja o zaistniałym zagrożeniu	15	6	6	540	Nieakceptowalne
35.	Niewłaściwe użycie narzędzi pracy	7	6	3	126	Średnie
36.	Niedostateczne doświadczenie zawodowe	15	6	3	270	Poważne
37.	Niezabezpieczenie maszyn przed niepożądanym ich uruchomieniem	15	6	6	540	Nieakceptowalne
38.	Uszkodzenia powstałe podczas eksploatacji maszyn	15	6	3	270	Poważne
39.	Wady w konstrukcji	7	6	6	252	Poważne
40.	Wady wykonawcze	7	6	6	252	Poważne
41.	Zaburzenia geologiczne	40	10	6	2400	Nieakceptowalne
42.	Odpężenia eksploatacyjne	15	6	6	540	Nieakceptowalne
43.	Wykonywanie robót strzałowych	40	10	3	1200	Nieakceptowalne

7.6. Działania profilaktyczne

Podstawową zasadą podczas eliminacji, ograniczenia występującego zagrożenia jest rozpoczęcie działań korygująco-zapobiegawczych u źródła i zastosowanie takich środków, które swoim zasięgiem będą obejmowały jak największą liczbę pracowników. Najlepszą metodą jest zastosowanie powyższych środków w następującej kolejności [7]:

- użycie środków technicznych u źródła,
- zastosowanie środków zbiorowych,
- wykorzystanie środków organizacyjnych,
- zastosowanie środków ochrony indywidualnej.

Poniżej (tab. 7.6) zestawiono działania profilaktyczne, które wynikały z przeprowadzonej oceny ryzyka zawodowego na stanowisku operatora wiertnicy. Szczególną uwagę zwrócono na profilaktykę związaną z redukcją zanieczyszczenia powietrza gazami, substancjami niebezpiecznymi i pyłami powstałymi przy drażeniu tuneli. Zaproponowano tutaj między innymi: stosowanie urządzeń odpylających, prowadzenie bieżącego monitoringu tych zagrożeń, szkolenia załogi, używanie spryskiwaczy wodnych, stosowanie zraszania, kontrole stanu technicznego maszyn czy też stosowanie przeciwgazowych środków ochrony indywidualnej.

Działania profilaktyczne na stanowisku operatora wiertnicy

Lp.	Zagrożenie	Profilaktyka
Ochrona przed czynnikami chemicznymi		
1.	Substancje trujące, radioaktywne, uczulające, rakotwórcze i toksyczne	stosowanie przez pracowników zasad i przepisów Bezpieczeństwa i Higieny Pracy, wyposażenie pracowników w środki ochrony indywidualnej, zastosowanie środków ochrony zbiorowej, zmniejszenie do minimum liczby pracowników będących w bezpośrednim miejscu występowania zagrożenia, systematyczne kontrole stężenia substancji chemicznych, szkolenia pracowników, kontrole stanu technicznego maszyn
2.	Pyły	stosowanie urządzeń odpylających, zastosowanie profilaktyki pyłowej, prowadzenie bieżącego monitoringu zagrożeń, szkolenia załogi, zaopatrzenie pracowników w maski przeciwpyłowe, używanie spryskiwaczy wodnych, stosowanie zraszania
Ochrona przed czynnikami fizycznymi		
1.	Zagrożenie wentylacyjne	doprowadzanie świeżego powietrza do przodka wyrobiska, przewietrzanie wyrobisk tunelowych, bieżąca kontrola temperatury i składu powietrza, aktualizowanie projektów wentylacji, stosowanie generatorów, szkolenia pracowników, zaopatrzenie pracowników w środki ochrony indywidualnej i zbiorowej
2.	Zagrożenie pożarowe	zaopatrzenie w sprzęt przeciwpożarowy, szkolenia pracowników w zakresie umiejętnego posługiwania się sprzętem przeciwpożarowym, utrzymanie sprzętu w odpowiednim stanie technicznym, zastosowanie środków ochrony indywidualnej, wyposażenie wyrobisk w rurociągi przeciwpożarowe
3.	Wybuch gazów technicznych	magazynowanie gazów poza obrębem wyrobisk podziemnych tunelu, wykorzystywanie gazów zgodnie z zasadami bezpieczeństwa, szkolenia załogi w zakresie umiejętnego wykonywania prac z użyciem gazów technicznych, zapewnienie pracownikom środków ochrony indywidualnej
Ochrona przed zagrożeniami naturalnymi		
1.	Zagrożenie wodne	stały monitoring zagrożenia, prowadzenie bieżącej kontroli, odwadnianie, regularne usuwanie wad, szkolenia pracowników, ograniczenia w przebywaniu pracowników w miejscu najbardziej narażonym na wystąpienie zagrożenia
2.	Zagrożenie pożarami	zaopatrzenie pracowników w sprzęt przeciwpożarowy, szkolenia pracowników w zakresie umiejętnego posługiwania się sprzętem przeciwpożarowym, utrzymanie sprzętu w odpowiednim stanie technicznym, zastosowanie środków ochrony indywidualnej, wykonywanie pomiarów temperatury i składu atmosfery, wyposażenie wyrobisk w rurociągi przeciwpożarowe
3.	Zagrożenia tąpnięciami	stosowanie przez pracowników środków ochrony indywidualnej (hełm, aparat ucieczkowy), szkolenia pracowników, prowadzenie monitoringu zagrożenia, bieżąca kontrola, zmniejszenie czasu pracy w miejscach zagrożonych, stosowanie środków likwidacji i kontroli skuteczności działań
4.	Zagrożenia wyrzutami gazów i skał	prowadzenie kontrolnych pomiarów desorpcji gazu, odmetanowanie górotworu, odprężenie pokładów, zastosowanie strzałów wstrząsowych i odprężających, zatłaczanie wody do pokładu, monitorowanie zagrożenia, szkolenia pracowników, zastosowanie przez pracowników ucieczkowego sprzętu izolującego układ oddechowy
5.	Zagrożenia siarkowodorowe	monitoring zagrożenia, bieżąca kontrola, stosowanie przeciwgazowych środków ochrony indywidualnej, zaopatrzenie pracowników w indywidualny sprzęt do pomiaru stężenia siarkowodoru, pokrycie źródła uwalniania siarkowodoru środkiem doszczelniającym, przewietrzanie prądami powietrza, izolowanie stref zagrożonych, szkolenia załogi
6.	Zagrożenia substancjami promieniotwórczymi	zaopatrzenie pracowników w środki ochrony indywidualnej, tj. maski przeciwgazowe i przeciwpyłowe, hełmy, rękawice i tym podobne, monitorowanie zagrożenia i prowadzenie bieżącej kontroli, szkolenia załogi, wycofanie załogi z miejsc zagrożonych

Ochrona przed czynnikami technicznymi		
1.	Niedostateczna znajomość zasad bezpieczeństwa i higieny pracy	przeprowadzanie w zakładzie szkoleń z zakresu zasad Bezpieczeństwa i Higieny Pracy, zaznajomienie się z instruktażem stanowiskowym, znajomość przepisów związanych z wykonywaną pracą, przeprowadzanie kontroli ze znajomości panujących zagrożeń i przeprowadzania profilaktyki
2.	Oberwanie się skał ze stropu	klejenie warstw stropowych, wykonanie obcinki, prętowanie, wykonanie obudowy tymczasowej, wykonanie otworów wielkośrednicowych, szkolenia pracowników, zapoznanie pracowników z instruktażem w przypadku wystąpienia zagrożenia
3.	Nieużycie ochron osobistych	szkolenia pracowników, przestrzeganie zasad Bezpieczeństwa i Higieny Pracy, bieżąca kontrola prowadzona przez Kierownika Ruchu Zakładu czy też osobę do tego uprawnioną, nałożenie kar za braki w przestrzeganiu zasad
4.	Braki w wyszkoleniu zawodowym	zatrudnianie osób mających odpowiednie kwalifikację, uprawnienia, przeszkolenia, przeprowadzanie szkoleń dla nowych pracowników, bieżąca kontrola postępów pracy, monitoring jakości wykonywanych robót
5.	Brak lub niedostateczna informacja o zaistniałym zagrożeniu	wstępne szkolenia z zakresu zasad Bezpieczeństwa i Higieny Pracy, przeprowadzanie instruktażu stanowiskowego, informowanie o zagrożeniach na danym środowisku pracy, zapewnienie bezpiecznych miejsc pracy, zastosowanie środków ochrony indywidualnej i zbiorowej, postępowanie zgodnie z obowiązującymi przepisami w Zakładzie Ruchu
6.	Niedostateczne doświadczenie zawodowe	możliwość ukończenia kursów, szkoleń zawodowych, zapoznanie się z panującymi przepisami, szkolenia z zakresu zasad Bezpieczeństwa i Higieny Pracy
7.	Uszkodzenia powstałe podczas eksploatacji maszyn	zapewnienie odpowiedniego stanu technicznego maszyn i urządzeń, bieżące prowadzenie przeglądów technicznych, napraw, monitorowanie zagrożenia, szkolenia załogi, postępowanie zgodnie z zasadami Bezpieczeństwa i Higieny Pracy, odpowiednia konserwacja maszyn i urządzeń, operatorzy mający odpowiednie kwalifikacje i uprawnienia
8.	Niezabezpieczenie maszyn przed niepożądanym ich uruchomieniem	zapobieganie niespodziewanemu uruchomieniu, stosowanie dodatkowych środków zabezpieczających, wykorzystanie wyłącznika awaryjnego i samoczynnego, użycie urządzenia rozłączającego, zastosowanie sygnalizacji ostrzegawczej, stateczność maszyny, wytworzenie bezpiecznej przestrzeni
9.	Wady w konstrukcji	dobór odpowiednich materiałów, kontrole jakości materiałów, przeprowadzanie testów wytrzymałościowych, brak koncentracji i przeszkolenie pracowników
10.	Wady wykonawcze	stosowanie zaleceń projektowych, bieżąca kontrola jakości wykonanych robót, pracownicy mający odpowiednie kwalifikacje i uprawnienia, szkolenia załogi, brak koncentracji pracowników
11.	Zaburzenia geologiczne	prowadzenie monitoringu i pomiarów intensywności desorpcji metanu, ocena stanu zagrożenia, wykonanie pomiarów badawczych, zastosowanie środków ochrony indywidualnej i zbiorowej, ocena warunków geologiczno-górnictwowych
12.	Odrężenia eksploatacyjne	odprężenie, zapobieganie koncentracji naprężeń, stosowanie bezpiecznych systemów, stosowanie wytrzymałej obudowy i jej prawidłowe wykonanie, zastosowanie odpowiednich metod i aktywnych środków, systematyczne prowadzone prace
13.	Wykonywanie robót strzałowych	przestrzeganie przepisów Bezpieczeństwa i Higieny Pracy, szkolenia pracowników, zatrudnienie pracowników mających odpowiednie kwalifikacje i uprawnienia, postępowanie zgodnie z zasadami ustalonymi przez Kierownika Ruchu Zakładu, zapewnienie pracownikom bezpiecznego miejsca, zabezpieczenie posterunków, bieżące usuwanie niewypałów, wykonywanie pomiarów prądów, ciągły monitoring zagrożenia

7.7. Podsumowanie

Z roku na rok zwiększa się liczba wypadków podczas wykonywania robót górniczych. Prowadzą one do uszkodzenia ciała lub nawet śmierci pracowników. Na podstawie przeprowadzonej oceny ryzyka zawodowego pracodawca powinien ograniczyć ryzyko do możliwie najniższego poziomu. W celu zredukowania zagrożenia w środowisku pracy proponuje się działania profilaktyczne i rozwiązania, które pozwolą na zmianę kategorii ryzyka z krytycznej na akceptowalną, czyli taką, dla której stosuje się tylko i wyłącznie działania zapobiegawcze przed wystąpieniem potencjalnego ryzyka. Po określeniu dokładnych przyczyn i okoliczności mających wpływ na wystąpienie ryzyka w miejscu pracy, należy ponownie przeprowadzić ocenę ryzyka zawodowego, zapewnić szkolenia na stanowisku pracy oraz dostęp do instrukcji bezpiecznego wykonywania zawodu. Działania zapobiegawcze przed wystąpieniem zagrożenia powinny się skupić na doposażeniu miejsc i stanowisk pracy zarówno w środki ochrony zbiorowej, jak i indywidualnej oraz w systemy: akustyczny i optyczny w celu lepszego oraz szerszego sygnalizowania o możliwym zagrożeniu. Należy również w sposób szczególny zabezpieczyć wejścia do podziemnych wyrobisk tunelowych, oznakować dogi ucieczkowe, wykonać zabezpieczenia miejsc szczególnie narażonych na niebezpieczeństwo oraz oznakować i zabezpieczyć miejsca wykonywania robót strzałowych.

Poważnym problemem w zapewnieniu bezpieczeństwa pracownikom są zanieczyszczenia powietrza gazami, substancjami niebezpiecznymi i pyłami powstałymi przy drażeniu tuneli. Dotyczy to nie tylko substancji niebezpiecznych powstałych podczas robót, ale także np. zanieczyszczenia powietrza gazami spalinowymi pracujących tam maszyn i urządzeń. Mimo wprowadzania kolejnych ograniczeń dotyczących pracy urządzeń (normy EURO 4, 5 i 6) w dalszym ciągu odnotowuje się incydenty przekroczenia dopuszczalnych wartości NDS dla gazów spalinowych (w tym tlenków azotu). Zaproponowane w pracy środki profilaktyki (dla zagrożeń, gazowych, pyłowych i ogólnie wentylacyjnych) powinny zapewnić bezpieczną, zgodną z przepisami i normami pracę na tych stanowiskach.

W razie wystąpienia zagrożenia dla życia czy też zdrowia pracowników lub osób przebywających w takim tunelu powinno się wstrzymać rozpoczęte roboty i niezwłocznie wycofać ludzi w miejsca bezpieczne, zgodnie z ustaleniami planu ratownictwa. W tym celu drogi ucieczkowe powinny być oznakowane, a ich schemat aktualizowany na bieżąco wraz z postępem wykonywanych prac. Z uwagi na brak

własnych służb ratownictwa, w zakładach powinna być zapewniona stała możliwość udziału w akcji podmiotom bezpośrednio trudniącym się ratownictwem górniczym. Odpowiedni sprzęt ratowniczy i urządzenia powinny być zlokalizowane w pobliżu stref zagrożenia.

Bibliografia

1. Stamatello H.: Tunele i miejskie budowle podziemne, Wydawnictwo Arkady, Warszawa 1970.
2. Czaja P.: Tunele – współczesne potrzeby cywilizacyjne i technologiczne możliwości ich zaspokojenia, Nowoczesne Budownictwo Inżynieryjne. T.4, Kraków 2012, s. 34–40.
3. Cała M.: New Australian Tunnelling Method. Opracowanie AGH, Kraków 2004.
4. https://inzynieria.com/tunele/konferencja_budownictwo_podziemne/analizy_i_komentarze/43169,tylko-u-nas-zagrozenia-towarzyszace-budowie-tuneli.
5. Romanowska-Słomka I., Słomka A.: Zarządzanie ryzykiem zawodowym. Wydanie IV, Kraków-Tarnobrzeg 2008.
6. Krause M.: Ocena ryzyka zawodowego – wymagania, wytyczne, przykłady. Wydania I. Wyższa Inżynierska Szkoła Bezpieczeństwa i Organizacji Pracy. Radom 2008.
7. Tajduś A.: Ryzyko w budownictwie tunelowym. Opracowanie AGH, Kraków 2022.

8. OCENA SKUTKÓW PODZIEMNEJ EKSPLOATACJI ZŁOŻA WĘGLA KAMIENNEGO W BUDYNKU MIESZKALNYM

8.1. Wprowadzenie

Podziemna eksploatacja górnicza złóż węgla kamiennego w Górnośląskim Zagłębiu Węglowym (GZW) położonym w południowej Polsce jest prowadzona już od XVI w. W zagłębiu tym znajduje się 128 udokumentowanych złóż węgla kamiennego, z których 50 jest zagospodarowanych. Około 27% powierzchni GZW zajmują obszary perspektywiczne, gdzie oszacowano zasoby występujące na głębokości do 1000 m. Około 46% powierzchni zagłębia zajmują obszary o zasobach prognostycznych, zalegających na głębokościach większych od 1000 m [1]. W obecnej chwili znaczna część zasobów perspektywicznych jest już wyeksploatowana, co zmusza zakłady górnicze do prowadzenia eksploatacji na znacznych głębokościach lub zintensyfikowania wydobywania na udostępnionych już poziomach. Często prowadzi to do powstania parcel o skomplikowanym kształcie geometrycznym lub wzajemnego nakładania się ich konturów. Niewłaściwa geometria pola eksploatacyjnego [2] nierzadko jest przyczyną powstawania nieciągłych deformacji na powierzchni terenu, w szczególności typu liniowego [3–7].

W niniejszym podrozdziale przedstawiono przykład eksploatacji złóż węgla kamiennego zrealizowanej w GZW, w 2019 roku na stosunkowo niewielkich (średnich) głębokościach i jej wpływ na pobliski budynek mieszkalny [8]. Odpowiednimi pomiarami geodezyjnymi określono wychylenia jego ścian na zewnątrz i wewnątrz oraz nachylenie posadzki w środku budynku. Największe wychylenie o wartości około 23 mm/m odnotowano na jego zewnętrznej, południowej ścianie. Zbieżne położenie parceli ze wcześniej eksploatowanymi ścianami przyczyniło się do powstania na powierzchni terenu, w rejonie obiektu budowlanego nieciągłych deformacji typu liniowego (jeden stopień terenowy pod domem i trzy stopnie w jego pobliżu). Budynek doznał znacznych uszkodzeń zarówno wewnątrz, jak i na zewnątrz. Wystąpiły pęknięcia stropów i ścian działowych oraz elewacji.

8.2. Materiał badawczy

Przedmiotowa eksploatacja była realizowana w południowej części Polski, w Górnośląskim Zagłębiu Węglowym – Okręg Rybnicki, Ściana 1/II w pokładzie węgla kamiennego 405/1, od marca do sierpnia 2019 roku. Parcela była prowadzona na głębokości wynoszącej od 500 m na południu do 610 m na północy oraz na wysokość 2,0 m, a jej wybieg i długość wynosiły odpowiednio 445 m i 222 m. Złoże zapadało się w kierunku północnym pod znacznym kątem 21° .

W latach 2013–2018 we wspomnianym rejonie była także prowadzona eksploatacja pokładu 404, za pomocą dwóch warstw 3 i 5 oraz czterech Ścian 1/II i 2/II znajdujących się w każdej z wyodrębnionych warstw. Wydobycie węgla kamiennego odbywało się na głębokości od 410 m (Ściana 1/II w pokładzie 404/3) do 600 m (Ściana 2/II w pokładzie 404/5) oraz na wysokość od 3,3 m (Ściana 1/II w pokładzie 404/5) do 4,0 m (Ściana 1/II w pokładzie 404/3). Wyrobiska nachylone były pod kątem wynoszącym od $15,8^\circ$ (Ściana 2/II w pokładzie 404/3) do $21,1^\circ$ (Ściana 2/II w pokładzie 404/5), w kierunku północnym.

Omawiany budynek stanowi jednorodzinny dom mieszkalny, składający się z trzech kondygnacji: jednej kondygnacji podziemnej, stanowiącej podpiwniczenie (prócz części południowo-zachodniej) oraz dwóch kondygnacji nadziemnych, w których znajdują się pomieszczenia gospodarcze (garaż, warsztat), mieszkalne (kuchnie, łazienki, salony, sypialnie) i komunikacyjne (wiatrołap, przedsionek, hol, klatka schodowa).

Dom powstawał w trzech etapach. Część zachodnia została wybudowana w 1956 roku. Składa się z części mieszkalnej ($10,04 \times 9,98$ m) oraz przedsionka ($3,28 \times 2,35$ m). Część mieszkalna nie została podpiwniczona w części południowo-zachodniej. W 1980 roku dobudowano część wschodnią, która ma wymiary $9,98 \times 5,60$ m. Ostatni etap rozbudowy obiektu miał miejsce w 1981 roku. Wówczas przedsionek powiększono o dodatkowe pomieszczenia.

Budynek w rzucie poziomym ma kształt prostokąta i wymiary 18×10 m. Wysokość budynku nad poziomem terenu wynosi 7,8 m. Obiekt ma ścianową konstrukcję nośną. Ściany parteru mają grubość od 0,38 m do 0,42 m i zostały wykonane z cegły. Ściany na piętrach mają grubość od 0,24 m do 0,44 m. Wszystkie stropy zrobione są z betonu z dźwigarami stalowymi. Dach budynku wykonano jako stropodach bez wentylacji. Izolację termiczną wykonano z żużla. Dach pokryto warstwami papy bitumicznej.

Budynek przeszedł liczne remonty. Nastąpiła zmiana konstrukcji dachu nad zachodnią częścią budynku. Nowy dach wykonano z drewna pokrytego papą bitumiczną. W 2016 roku wykonano opaskę żelbetową na poziomie fundamentów obiektu, która biegnie wokół budynku i ścian nośnych. Opaska zewnętrzna ma kształt prostokąta i wymiary 0,5×1,0 m. Została ona wzmocniona 22 podłużnymi prętami o średnicy 18 mm. Fragmenty opaski wewnątrz budynku (wzdłuż ścian nośnych) mają kształt prostokąta i wymiary 0,4×0,2 m. Wzmocnione są 8 prętami o średnicy 18 mm.

Obecnie budynek pełni wyłącznie funkcję mieszkalną. Część wschodnia jest wyłączona z użytkowania ze względu na jej zły stan techniczny. W tej części znajdował się kiedyś warsztat samochodowy i sklep spożywczy.

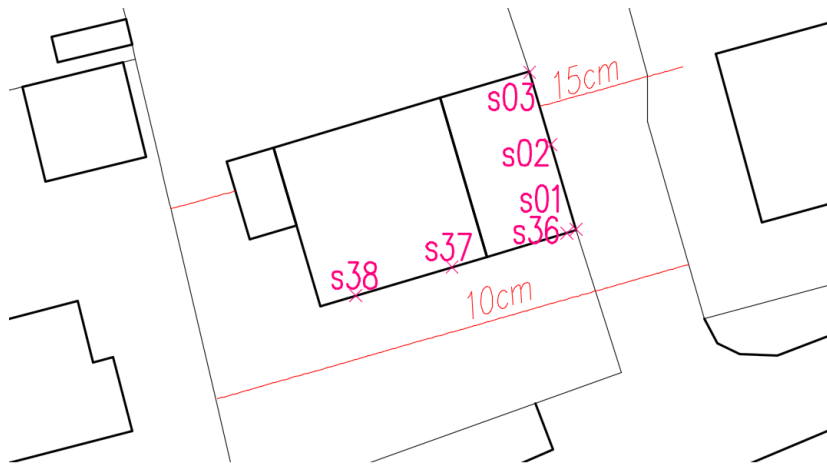
Na rysunku 8.1 przedstawiono widoki domu od stron a) południowej, b) południowo-zachodniej, c) północnej, d) wschodniej.



Rys. 8.1. Dom jednorodzinny poddany analizie wpływów eksploatacji węgla kamiennego
 Fig. 8.1. A single – family house subjected to an analysis of the impacts of a hard coal exploitation

8.3. Metody badawcze

W celu obserwacji w budynku skutków eksploatacji Ściany 1/II znajdującej się w pokładzie 405/1 oraz wcześniejszych eksploatacji przeprowadzonych w pokładzie 404, założono sieć obserwacyjną składającą się z 6 punktów pomiarowych (s01, s02, s03, s36, s37, s38) zastabilizowanych w dwóch, mniej więcej prostopadłych kierunkach. Punkty w postaci metalowych bolców umieszczono w elewacji budynku, na jego ścianach wschodniej i południowej, po trzy w każdym z wyżej wymienionych kierunków (rys. 8.2). Średnia odległość pomiędzy poszczególnymi punktami wynosiła ok. 5,7 m.



Rys. 8.2. Położenie punktów pomiarowych na ścianach budynku
Fig. 8.2. Location of measuring points on the building's walls

Wpływy dokonanej eksploatacji na budynek zostały określone za pomocą podwójnej niwelacji technicznej w przód, z dwóch różnych stanowisk, ze zruszeniem instrumentu. Do tego celu wykorzystano niwelator optyczny Nivel System N32x wraz z zestawem: dwie aluminiowe łąty niwelacyjne TS-50, jeden aluminiowy statyw SJJ1 (rys. 8.3), o dokładności $\pm 1,5$ mm/km.



Rys. 8.3. Zestaw do niwelacji technicznej
Fig. 8.3. A technical leveling set

Pierwsze pomiary niwelacyjne wykonano jeszcze przed rozpoczęciem eksploatacji w Ścianie 1/II (pokł. 405/1), 4 marca 2019 roku. Częstość pomiarów wynosiła od 2 do 4 tygodni i była uzależniona od położenia frontu eksploatacyjnego ściany w stosunku do budynku. W przypadku gdy front zbliżał się do obiektu, zwiększono częstość prowadzonych obserwacji. Ostatni pomiar został wykonany na zakończenie biegu ściany, czyli 17 sierpnia 2019 roku.

W poszczególnych cyklach obserwacyjnych wyznaczano względne różnice wysokości oraz mierzono odległości poziome pomiędzy sąsiednimi punktami położonymi wzdłuż danego kierunku, co umożliwiło określenie zmian wartości wychyleń T zewnętrznych ścian budynku w płaszczyźnie poziomej z zależności:

$$T_{i,i+1}^n = \frac{\Delta h_{i,i+1}^n}{d_{i,i+1}^n} \cdot 1000 \text{ ‰}, \quad (8.1)$$

gdzie:

d – odległość [m],

Δh – przewyższenie [mm],

i – punkt pomiarowy,

n – cykl pomiarowy,

T – wychylenie.

Pomiary odległości wykonano elektronicznym dystansomierzem Leica D510 o dokładności $\pm 1 \text{ mm/m}$ (rys. 8.4).



Rys. 8.4. Dystansomierz

Fig. 8.4. A distomat

Ponadto 5 września 2019 roku zmierzono także wychylenia zewnętrznych ścian budynku w płaszczyźnie poziomej na nadprożach okien za pomocą elektronicznego pochyłomierza SOLA ENWM60 (rys. 8.5).



Rys. 8.5. Pochyłomierz
Fig. 8.5. An inclinometer

W celu kontroli stanu technicznego wnętrza budynku, 5 września 2019 roku w dolnych narożach wszystkich pomieszczeń wykonano pomiary wychyleń ich ścian (płaszczyzna pionowa) oraz posadzek (płaszczyzna pozioma) za pomocą wspomnianego pochyłomierza.

8.4. Wyniki i ich omówienie

W tabeli 8.1 i na rysunku 8.6 przedstawiono wyniki pomiarów wychyleń budynku wykonanych:

- 17.08.2019 roku na punktach ściennych s01, s02, s03, s36, s37, s38 zastabilizowanych na zewnątrz budynku, w jego elewacji, w płaszczyźnie poziomej (kolor pomarańczowy),
- 05.09.2019 roku na nadprożach okien, na zewnątrz budynku, w płaszczyźnie poziomej (kolor zielony),
- 05.09.2019 roku na posadzkach pomieszczeń, wewnątrz budynku, w płaszczyźnie poziomej (kolor różowy),
- 05.09.2019 roku na ścianach pomieszczeń, wewnątrz budynku, w płaszczyźnie pionowej (kolor niebieski).

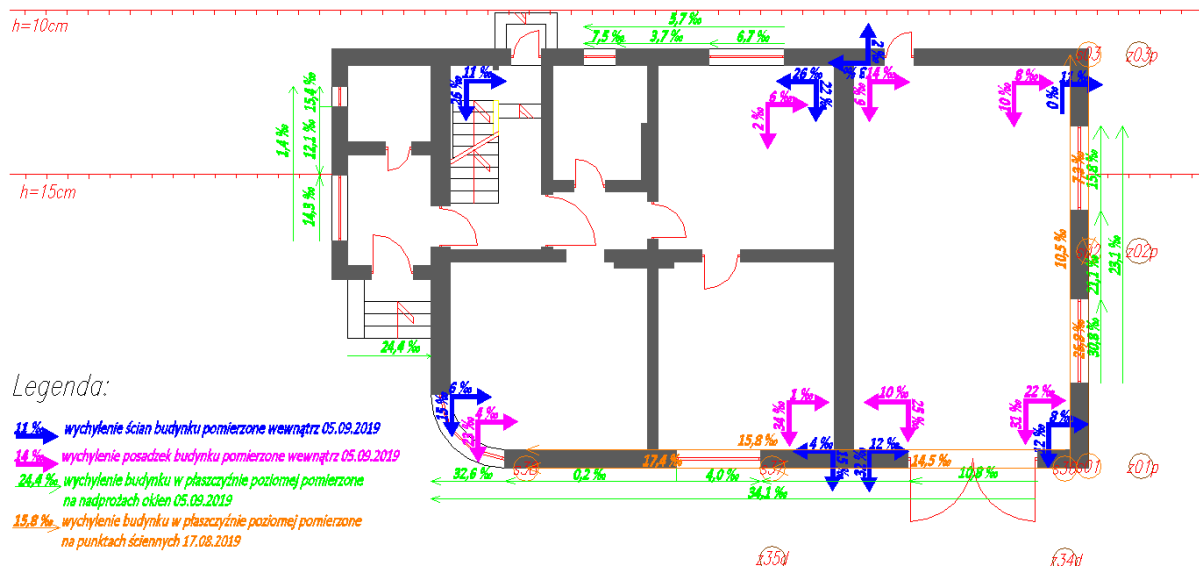
Na podstawie zaprezentowanych wartości wychyleń budynku można stwierdzić, że średnie wychylenie wschodniej ściany budynku pomierzone na zewnątrz zarówno na punktach ściennych (17,1‰), jak i na nadprożach okien (23,3‰) jest większe od średniego wychylenia jego południowej ściany (odpowiednio 16,0‰ i 6,4‰). Średnia wartość wychylenia posadzek w wewnętrznych pomieszczeniach budynku również wskazuje na jego większe wychylenie wzdłuż wschodniej ściany (28,3‰ generalnie

w kierunku północnym) aniżeli południowej (9,3% w kierunku zachodnim). Jest to związane z dwoma aspektami:

- prowadzeniem eksploatacji górniczej na południe od budynku o kierunku południowo-północnym,
- wystąpieniem dwóch nieciągłych liniowych deformacji terenu w postaci stopni terenowych (LNDT) w kierunku mniej więcej prostopadłym do wschodniej ściany budynku: jednego pod nim, między punktami s02 – s03, o zrzucie o wartości 15 cm na południe, a drugiego za budynkiem, o zrzucie o wartości 10 cm również w kierunku południowym (rys. 8.6).

Tabela 8.1
Wchylenia budynku pomierzone 17.08.2019 roku i 05.09.2019 roku

Miejsce pomiaru	Wchylenie T [‰]	Kierunek wchylenia
s01 – s02	26,8	N
s02 – s03	7,3	S
s36 – s37	14,5	W
s37 – s38	17,4	W
nadproże nad s01 – s02	30,8	N
nadproże nad s02 – s03	15,8	N
nadproże nad s36 – s37	10,8	W
nadproże nad s37 – s38	2,0	W



Rys. 8.6. Wchylenia budynku pomierzone 17.08.2019 roku i 05.09.2019 roku w płaszczyznach poziomych i pionowej

Fig. 8.6. Building's inclinations measured on August 17, 2019 and September 5, 2019 in the horizontal and vertical planes

Pojawienie się LNDT pod budynkiem zmieniło kierunek jego wychylenia z południowego (w stronę zrobów) na północny [9].

Ponadto wartości wychyleń ścian (do 32‰ pomiędzy punktami s36 i s37, w południowo-zachodniej części garażu) wskazują na to, że budynek doznał także znacznych odchyień od pionu, głównie w kierunku południowym. Należy przy tym zaznaczyć, że odchylenia te miały różne wartości, kierunki i zwroty w zależności od miejsca pomiaru (niepodpiwniczona i podpiwniczona części budynku, ściany nośne i działowe).

8.5. Uszkodzenia budynku

Na skutek eksploatacji przeprowadzonej w pokładach 404 i 405 w latach 2013–2019 na południe od budynku doznał on znacznych uszkodzeń zarówno na zewnątrz, jak i wewnątrz.

Na zewnątrz najbardziej ucierpiały wschodnia i południowa ściany budynku. Wschodnia ściana pękła wzdłuż stopnia terenowego o zrzucie 15 cm na południe, od którego powstały symetryczne pęknięcia, szczeliny i rysy rozwierające się w kierunku dachu (rys. 8.7a). Na poddaszu doszło do pęknięcia ściany i odspojenia się kawałka elewacji (rys. 8.7b).

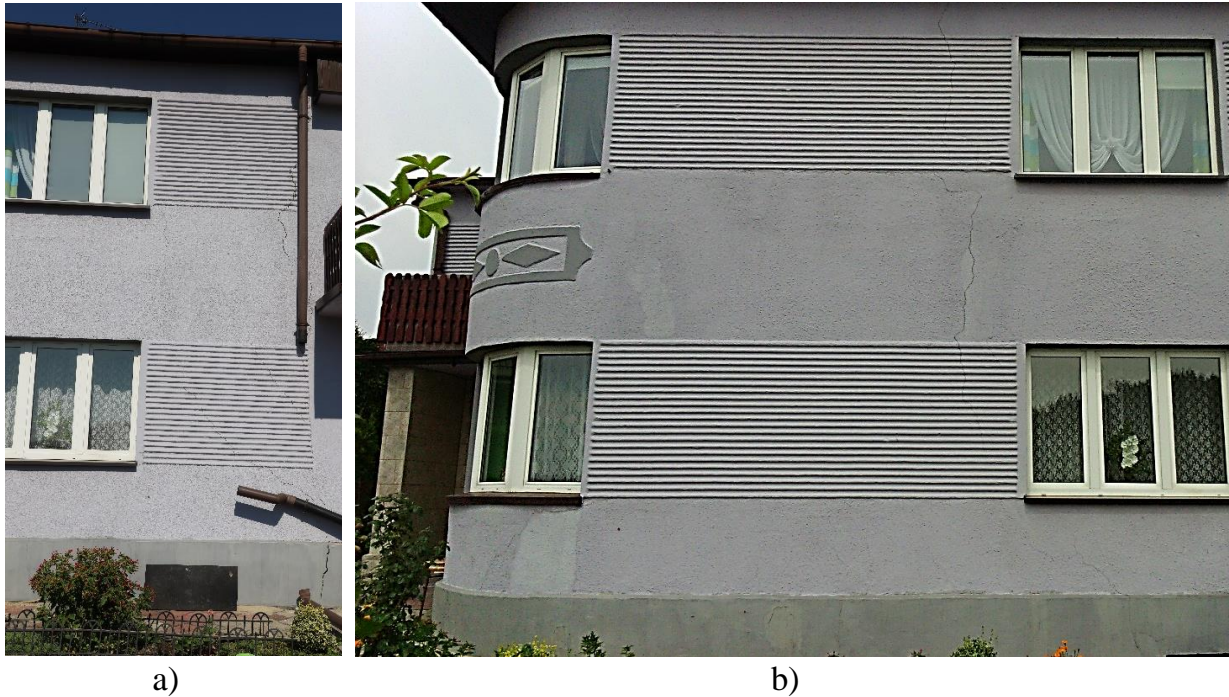


Rys. 8.7. Uszkodzenia wschodniej ściany budynku: a) stopień terenowy na drodze i symetryczne pęknięcia elewacji, b) pęknięcia poddasza

Fig. 8.7. Damages of a building's eastern wall: a) a ground step on the road and symmetric cracks of elevation, b) the cracks of attic

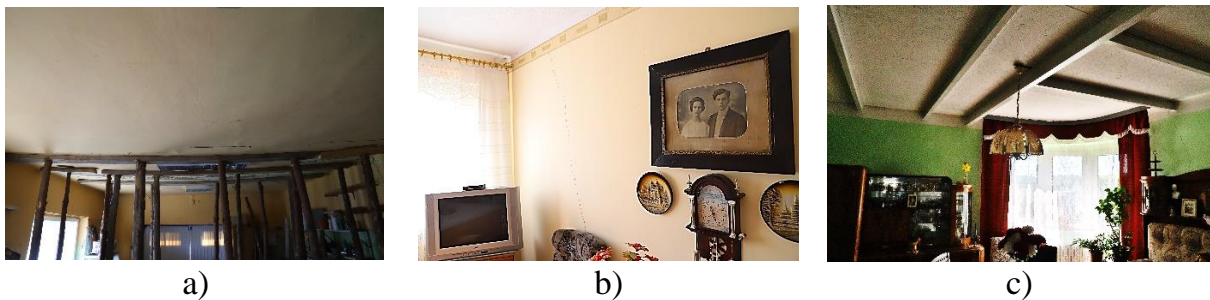
Wzdłuż południowej ściany również doszło do dwóch poważnych, pionowych pęknięć. Pierwsze powstało między gospodarczą (garaż i warsztat) a mieszkalną (sypialnia) częściami budynku (rys. 8.8a). Drugie pęknięcie nastąpiło w części

mieszkalnej, pomiędzy sypialnią a salonem, czyli podpiwniczoną i niepodpiwniczoną częściami domu (rys. 8.8b).



Rys. 8.8. Uszkodzenia południowej ściany budynku: a) pionowe pęknięcie między garażem a sypialnią, b) pionowe pęknięcie między sypialnią a salonem
 Fig. 8.8. Damages of a building's southern wall: a) a vertical crack between garage and bedroom, b) a vertical crack between bedroom and living room

W związku z licznymi uszkodzeniami zewnętrznych ścian budynku (wschodniej i południowej), na ścianach i stropach pomieszczeń (w garażu – rys. 8.9a, w sypialni – rys. 8.9b, w salonie – rys. 8.9c) pojawiły się szczeliny i rysy.



Rys. 8.9. Szczeliny i rysy wewnątrz budynku w: a) garażu, b) sypialni, c) salonie
 Fig. 8.9. Fissures and scratches inside the building in: a) garage, b) bedroom, c) living room

Ogólny stan techniczny domu jest zły, a jego użytkowanie bardzo uciążliwe dla mieszkańców. Występują znaczne nachylenia posadzek, podparcie stropów drewnianymi słupami, problemy z infrastrukturą techniczną (w szczególności z instalacjami wodną i kanalizacyjną).

8.6. Podsumowanie i wnioski końcowe

Pomiary wychyleń budynku przeprowadzone w płaszczyźnie poziomej (na zewnątrz budynku pomiędzy założonymi reperami ściennymi i wzdłuż nadproży okien oraz w jego wnętrzu na posadzkach pomieszczeń) zgodnie wskazały główne kierunki jego wychyleń na północ i zachód (północny-zachód), natomiast ich wartości były różne. Zatem przy wykonywaniu pomiarów wychyleń trzeba pamiętać o tym, że nie należy bezgranicznie ufać uzyskanym wynikom, albowiem są one jedynie przybliżeniem stanu rzeczywistego i zależą od sposobu, miejsca, metod, technik i narzędzi (sprzętu) wykorzystanych podczas pomiaru.

Odchylenia budynku od pionu pomierzone na ścianach wewnątrz pomieszczeń również uzyskały różne wartości, w zależności od tego, czy były mierzone w niepodpiwniczonej/podpiwniczonej części budynku oraz na ścianach nośnych/działowych. Generalny kierunek wychylenia w płaszczyźnie pionowej uzyskano jako południowy.

Wystąpienie nieciągłych deformacji powierzchni terenu typu liniowego w pobliżu budynku, a zwłaszcza pod nim, może zmienić pierwotne wartość i kierunek jego nachylenia [9] (tutaj wzrost wartości wychylenia wschodniej ściany budynku, pod którą prostopadle przebiega stopień terenowy oraz zmiana początkowego kierunku wychylenia z południowego na północny). Ponadto LNDT może także spowodować i/lub pogłębić istniejące już uszkodzenia budynku, co w efekcie może pogorszyć jego stan techniczny i doprowadzić do znacznych utrudnień w jego użytkowaniu, częściowego lub całkowitego wyłączenia z użytkowania, a nawet katastrofy budowlanej.

Bibliografia

1. Główny Urząd Statystyczny: „Ochrona środowiska”, 2013, p. 133.
2. Orwat J.: Causes analysis of occurrence of the terrain surface discontinuous deformations of a linear type. “Journal of Physics – Conference Series”, Vol. 1426 (012016), 2020.
3. Wróblewska M., Grygierek M.: Assessment of visual representation methods of linear discontinuous deformation zones in the right-of-way. “Applied Sciences – Basel”, Vol. 12(2538), 2022.
4. Strzałkowski P., Szafulera K.: Occurrence of linear discontinuous deformations in Upper Silesia (Poland) in conditions of intensive mining extraction – case study. “Energies”, Vol. 13(8), 2020.

5. Ścigala R., Szafulera K.: Linear discontinuous deformations created on the surface as an effect of underground mining and local geological conditions – case study. “Bulletin of Engineering Geology and the Environment”, Vol. 79(3), 2020, p. 2059–2068.
6. Strzałkowski P.: Some remarks on impact of mining based on an example of building deformation and damage caused by mining in conditions of Upper Silesian Coal Basin. “Pure and Applied Geophysics”, Vol. 176, 2019, p. 2595–2605.
7. Orwat J.: Influence of discontinuous linear deformation on the values of continuous deformations of a mining area and a building induced by an exploitation of hard coal seam. “Applied Sciences – Basel”, Vol. 13(6), 2023.
8. Orwat J., Gromysz K.: Occurrence consequences of mining terrain surface discontinuous linear deformations in a residential building. “Journal of Physics – Conference Series”, Vol. 1781(012013), 2021.
9. Orwat J.: Wpływ występowania nieciągłej deformacji typu liniowego na wychylenie budynku. „Współczesne zagadnienia z inżynierii ładowej: Prace naukowe doktorantów”, Vol. 837, 2020, p. 259–270.

9. WPŁYW TEMPERATURY I PH NA STABILNOŚĆ WYBRANYCH HORMONÓW PŁCIOWYCH W PROCESIE ZATĘŻANIA ICH ROZTWORÓW

9.1. Wprowadzenie

Postęp cywilizacyjny niesie ze sobą wiele konsekwencji dla ekosystemu, w tym zagraża zdrowiu ludzi. Jednym z niepożądanych skutków szeroko pojętego postępu technologicznego oraz rozwoju przemysłu farmaceutycznego jest wzrastające zanieczyszczenie środowiska hormonami płciowymi, ich metabolitami i pochodnymi, a także syntetycznymi związkami chemicznymi, wykazującymi działanie hormonopodobne [1]. Choć występują one jako mikrozanieczyszczenia (w stężeniach rzędu ng/L) [2–4], to w sposób istotny oddziałują na żywe organizmy, począwszy od wywoływania zmian ekspresji genów regulowanych przez hormony, przez modyfikowanie wzorców wzrostu, zmiany proporcji osobników różnych płci, zakłócenia funkcjonowania układu dokrewnego, zmiany metaboliczne, a nawet wpływają na zachowania behawioralne u zwierząt wyższych [5, 6].

Wspomniane zagrożenia i skutki zwiększonej podaży związków endokrynnie czynnych będą stanowiły w kolejnych latach coraz większy problem. Ze względu na lipofilowe właściwości cząsteczek hormonów (i niektórych substancji hormonopodobnych), determinujące ich skłonność do sorpcji na osadach nieorganicznych i materii organicznej, podlegają one akumulacji w środowisku [4–6]. W związku z powyższym, monitorowanie stężeń wspomnianych związków w próbkach środowiskowych staje się koniecznością, podobnie jak rozpoczęcie działań mających na celu minimalizowanie ich emisji np. przez opracowanie i wdrożenie odpowiednich procedur oczyszczania odpadowych wód komunalnych.

Do żeńskich hormonów płciowych obecnych w próbkach środowiskowych zalicza się progesteron (P) oraz estrogeny: estron (E1), 17 β -estradiol (β -E2, E2), 17 α -estradiol (α -E2), estriol (E3), stanowiące endogenne estrogeny ludzkie, oraz 17 α -etynyloestradiol (EE2), który jest hormonem syntetycznym, jednym z głównych składników środków antykoncepcyjnych [1, 7]. Estrogeny są wydalane wraz

z moczem głównie w formie siarczanowych i glukuronidowych pochodnych [8], co czyni ich cząsteczki lepiej rozpuszczalnymi w wodzie. Choć nie wykazują one aktywności estrogenowej, to pod wpływem enzymów produkowanych przez organizmy obecne w środowisku mogą ulegać dekonjugacji do wolnych hormonów, przez co ich obecność w zanieczyszczeniach stanowi zagrożenie dla fauny [9].

Podobnie wszystkie hormony płciowe, obecne w próbkach środowiskowych, mogą przekształcać się w inne gonadalne steroidy w reakcjach enzymatycznych i na skutek aktywności biologicznej mikroorganizmów (np. glonów) [7]. Dodatkowo, na zawartość hormonów w środowisku może także wpływać wiele czynników abiotycznych (m.in. materia organiczna, azotany, jony chlorkowe, chlor (Cl_2), dwutlenek chloru (ClO_2), ozon (O_3), światło słoneczne, w szczególności promieniowanie ultrafioletowego (UV), temperatura), które mogą prowadzić do ich degradacji [7]. Często jednak mechanizm rozkładu hormonów i powstałe produkty końcowe nie są znane.

Oznaczenia jakościowe i ilościowe związków aktywnych biologicznie, występujących w próbkach środowiskowych na poziomie mikrozanieczyszczeń, stanowią poważne wyzwanie chemii analitycznej. Ze względu na niskie stężenia analitu w próbce oraz ograniczenia dotyczące progu oznaczalności dla metod stosowanych w praktyce laboratoryjnej, często przeprowadzenie procesu zateżania jest koniecznym etapem przygotowania próbki do analizy na obecność i zawartość hormonów płciowych. Z jego wykonaniem wiąże się jednak ryzyko degradacji i utraty substancji oznaczanej. Stąd, w celu opracowania metodyki umożliwiającej powtarzalne oznaczanie zawartości gonadalnych hormonów steroidowych w próbkach środowiskowych, konieczne jest określenie zakresu stosowalności metod/technik analitycznych, konieczny jest dobór warunków przechowywania i przygotowania próbek, zapewniających stabilność analitu, a także niezbędne są optymalizacja parametrów przeprowadzenia oznaczeń analitycznych oraz charakterystyka chemiczna próbki (m.in. ze względu na możliwe oddziaływania matrycy).

W niniejszej pracy podjęto zagadnienie stabilności termicznej żeńskich hormonów płciowych oraz wpływu pH na wyniki ich oznaczeń w roztworach wzorcowych oraz próbkach środowiskowych. Badane parametry w sposób istotny wpływają na rozpuszczalność hormonów płciowych w wodzie, ich powinowactwo sorpcyjne, a także możliwość ich degradacji w obecności m.in. odpowiednich enzymów. Temperatura jest kluczowym parametrem podczas przechowywania i przygotowania próbki do analizy – z jednej strony na etapie zabezpieczenia i transportu próbki (preferowane niskie temperatury przechowywania), z drugiej na etapie zateżania,

w którym pod rozwagę można wziąć techniki polegające na odparowaniu rozpuszczalnika (gdzie ze względu na skrócenie czasu zateżenia preferowane są wysokie temperatury).

W niniejszej pracy podsumowano dostępne dane literaturowe, jak również zaprezentowano wyniki przeprowadzonych badań wpływu temperatury i pH na możliwość degradacji żeńskich hormonów płciowych podczas zateżenia ich roztworów, przy wykorzystaniu wyparki rotacyjnej oraz liofilizatora. Do jakościowej identyfikacji badanych próbek zastosowano metodę magnetycznego rezonansu jądrowego (^1H NMR), która pozwala na precyzyjne określanie struktury badanych substancji, a także na monitorowanie zmian w ich strukturze pod wpływem zastosowanych czynników (temperatury, pH), w odróżnieniu od najczęściej stosowanych metod oznaczania hormonów płciowych w próbkach rzeczywistych (tj. testów immunologicznych i enzymatycznych oraz metod spektrometrii mas; np. w sprzężeniu GC-MS lub HPLC-MS) [10, 11]. Prace eksperymentalne przeprowadzono na roztworach substancji wzorcowych (17β -estradiolu (E2), 17α -etynyloestradiolu (EE2), progesteronu (P)), w celu ograniczenia wpływu matrycy na uzyskane wyniki, co z kolei może stanowić kierunek dalszych badań.

9.2. Stabilność termiczna estrogenów i progesteronu w wodach środowiskowych i roztworach wzorcowych

W celu opracowania skutecznej metodyki oznaczania hormonów, szczególnie występujących w stężeniach w skali mikro- i nano- konieczne jest poznanie i scharakteryzowanie czynników i optymalnych wartości parametrów procesu ich oznaczania, które nie powodują zafałszowania uzyskanych wyników oznaczeń, np. przez degradację termiczną hormonów podczas przygotowania próbki do analizy. Dodatkowym, istotnym wyzwaniem w praktyce laboratoryjnej podczas badań próbek środowiskowych jest uwzględnienie wpływu matrycy na przebieg procesu analitycznego. Ze względu na występowanie interferentów w próbkach rzeczywistych, odpowiadające im wyniki oznaczeń hormonów mogą być w różnym stopniu obciążone błędem. W związku z powyższym, podczas analizy wpływu warunków przygotowania próbek do analizy należy zachować świadomość istnienia różnic pomiędzy optymalnymi warunkami oznaczania dla roztworów wzorcowych a złożonymi mieszaninami, którymi są próbki środowiskowe.

W pracach [9, 12–19] określano wrażliwość termiczną roztworów czystego 17 β -estradiolu (E2). W artykule [12] wykazano, że stabilność E2 w różnych temperaturach: 20–25°C, 4°C, -20°C, w czasie 24 i 48 godzin była bliska 100% i znajdowała się w przedziale akceptacji określonym jako 90–110% (tabela 9.1).

Tabela 9.1

Stabilność termiczna 17 β -estradiolu na podstawie badań opisanych w pracy [12]. E2 inkubowano przez 24 i 48h w -20°C, 4°C lub temperaturze pokojowej, a następnie określano zawartość E2 dwiema niezależnymi metodami, tj. przy wykorzystaniu spektrofotometrii UV-Vis oraz wysokosprawnej chromatografii cieczowej HPLC

Stężenie E2, ng/mL	Warunki przechowywania roztworu E2				
	20–25°C 24 h	4°C 24 h	-20°C 24 h	4°C 48 h	-20°C 48 h
	Zawartość procentowa E2, oznaczona metodą UV-Vis				
500	99,8	97,6	99,3	99,3	99,1
6000	99,6	99,3	99,7	99,5	99,8
12000	100,1	99,8	100,3	100,4	100,6
	Zawartość procentowa E2, oznaczona metodą HPLC				
100	97,6	98,1	99,4	97,7	99,6
2000	98,5	99,2	99,7	98,6	100,7
6000	101,2	101,7	100,6	102,1	101,8

Z kolei, w pracy [13] podsumowano wyniki badań stabilności termicznej estrogenów w próbkach wód środowiskowych. Szczególną uwagę zwrócono przy tym na wpływ obecności mikroorganizmów na rozkład hormonów znajdujących się w ściekach. Postuluje się bowiem, że temperatura może wpływać na degradację hormonów w sposób pośredni, przez zmiany aktywności mikroorganizmów i produkowanych przez nie enzymów.

Zgodnie z wynikami badań [14, 15], podczas oczyszczania ścieków z udziałem osadu czynnego nie zauważono korelacji pomiędzy temperaturą a rozkładem wolnych hormonów w zakresie od -2°C do ok. 23°C. Podobnie, obniżenie temperatury ścieków z 18°C do ok. 12°C nie prowadziło do bardziej efektywnego rozkładu wolnych estrogenów [16]. Zauważono jednak, iż wspomniany spadek temperatury prowadzi do redukcji o 20% usuwania 3-siarczanu estronu ze ścieków (z 78 \pm 4% do 59 \pm 6%), prawdopodobnie przez osłabienie aktywności biologicznej mikroorganizmów. Co więcej, badanie [17] wykazało wyraźną korelację między temperaturą a dekonjugacją estrogenu. Podczas prowadzonych badań laboratoryjnych zauważono także, że zanieczyszczenia EE2 w formie glukuronidальной pozostawały w fazie ciekłej

w temperaturze 4°C, podczas gdy związek ten został całkowicie usunięty w temperaturze 22°C.

Wydaje się zatem, że obniżenie temperatury nie wpływa na usuwanie wolnych estrogenów na skutek czynników biotycznych. Może ono w pewnym stopniu hamować hydrolizę hormonów sprzężonych, zwłaszcza typu siarczanowego, ze względu na negatywny wpływ niskiej temperatury na aktywność enzymów glukuronidowych i arylosulfatazy lub na mikroorganizmy, które produkują te enzymy [13]. Między innymi z tego względu zaleca się prowadzić długoterminowe przechowywanie próbek biologicznych zawierających hormony w temperaturach <70°C [20].

Na potwierdzenie warto wspomnieć o badaniach wód i osadów rzecznych, gdzie ilościowo opisano stopniową degradację tlenową 3-glukuronidu 17β-estradiolu (E2-3G) oraz 3-siarczanu 17β-estradiolu (E2-3S) w trakcie czternastodniowej inkubacji, w temperaturze pokojowej (20±3°C) [18]. Podobnie, w pracy [9] pokazano, że najczęściej stosowana temperatura przechowywania wodnych próbek środowiskowych (4°C) nie zapewnia pełnej inhibicji występujących w nich arylosulfatazy i β-glukuronidazy. W konsekwencji, siarczanowe i glukuronidowe pochodne estrogenów ulegają częściowemu rozkładowi (ok. 20% dla siarczanów) lub niemal całkowitemu rozkładowi (glukuronidy) w analizowanym czasie 48 godzin, w odpadowych wodach komunalnych [9]. Rozkład wspomnianych pochodnych estrogenów był częściowo zahamowany przez obniżenie temperatury z 20°C do 4°C w przypadku wód rzecznych i ścieków oczyszczonych [9].

9.3. Wpływ pH na stabilność estrogenów i progesteronu w wodach środowiskowych i roztworach wzorcowych

Odczyn roztworu w istotny sposób wpływa na rozpuszczalność hormonów w wodzie, ich powinowactwo sorpcyjne, a także kinetykę i efektywność ich przekształceń w inne związki pod wpływem czynników zewnętrznych [1,19,21].

Zgodnie z wynikami badań opisanymi w [22], rozpuszczalność E1, E2, EE2 w roztworach wodnych jest zależna od pH. Stosunkowo niską rozpuszczalność zaobserwowano dla obojętnego i kwaśnego odczynu (pH=7 i pH=4); mianowicie $S_{E1}=1,30\pm 0,08$ mg/l, $S_{E2}=1,51\pm 0,04$ mg/l, i $S_{EE2}=9,20\pm 0,09$ mg/l, dla pH=7 oraz $S_{E1}=1,24\pm 0,06$ mg/l, $S_{E2}=1,48\pm 0,03$ mg/l, i $S_{EE2}=9,10\pm 0,04$ mg/l, dla pH=4. Istotny wzrost tego parametru zaobserwowano w środowisku zasadowym, gdzie

$S_{E1}=2,27\pm 0,08$ mg/l, $S_{E2}=2,71\pm 0,09$ mg/l, i $S_{EE2}=10,80\pm 0,09$ mg/l, dla pH=10. Uzyskane rezultaty są zgodne z opisanymi w [23], gdzie badano właściwości E2 i zaobserwowano analogiczną tendencję we wzroście rozpuszczalności estradiolu wraz z alkalizacją środowiska.

Procesy sorpcyjne wpływają na biodostępność hormonów w środowisku. Zgodnie z doniesieniami [1, 24, 25] środowisko zasadowe (pH \geq 9) sprzyja desorpcji estrogenów i ich pochodnych z osadów nieorganicznych i materii organicznej, podczas gdy niepolarne cząsteczki progesteronu nie jonizują i są słabo rozpuszczalne w wodzie, pozostają w tych warunkach w postaci zaabsorbowanej.

W badaniach [9, 26] podjęto problem optymalnych warunków przechowywania próbek środowiskowych, zawierających wolne estrogeny oraz ich siarczanowe i glukuronidowe pochodne. Stwierdzono, że obniżenie pH do 3 zapobiega rozkładowi siarczanowych i glukuronianowych pochodnych hormonów nawet w temperaturze pokojowej, ze względu na inhibicję enzymów, katalizujących ich rozkład [9]. Z tego samego względu alkalizacja próbek do pH \geq 10 wydaje się równie efektywnym rozwiązaniem, lecz wymaga weryfikacji eksperymentalnej przy wykorzystaniu próbek rzeczywistych [26].

Innym przykładem analizy wpływu pH na procesy enzymatycznej degradacji hormonów są badania opisane w pracy [19]. Uzyskane wyniki pokazały, że rozkład estronu (E1), 17 β -estradiolu (E2), estriolu (E3), and 17 α -etynylostradiolu (EE2) przy udziale peroksydazy chrzanowej jest zależny od pH w zakresie od 5 do 9 i od temperatury reakcji w zakresie od 5°C do 35°C zarówno dla roztworów wzorcowych, jak i wód środowiskowych.

9.4. Materiały i metodyka badań

9.4.1. Odczynniki i aparatura

Badania przeprowadzono dla trzech wzorcowych hormonów firmy *Sigma*: 17 β -estradiolu (E2, nr kat. E2758), 17 α -etynyloestradiolu (EE2, nr kat. PHR1480) oraz progesteronu (P, nr kat.: P8783). Liofilizację wykonywano w urządzeniu CentriVap DNA Vacuum Concentrator firmy *Labconco*. Widma magnetycznego rezonansu jądrowego (^1H NMR) rejestrowano na spektrometrze Varian-600, przy częstotliwości 600 MHz. Jako rozpuszczalnik zastosowano deuterowany dimetylosulfotlenek (DMSO-d₆, *ACROS Organics*, Geel, Belgia), a kalibrację

przesunięć chemicznych wykonano przez dodanie wzorca wewnętrznego – tetrametylosilanu (TMS). Wszystkie przesunięcia chemiczne (δ) podano w ppm, a stałe sprzężenia (J) w Hz. Do wyjaśnienia obserwowanych krotności użyto następujących skrótów: s – singlet, d – dublet, dd-dublet dubletów, m – multiplet.

9.4.2. Przygotowanie próbek

Przygotowano bazowe roztwory wzorcowych hormonów o stężeniach odpowiednio: 19,8 mg E2/10 mL MeOH (17 β -estradiol), 20,1 mg EE2/10 ml MeOH (17 α -etynyloestradiol), 20,3 mg P/10 ml MeOH (progesteron).

Badanie wpływu podwyższonej temperatury na stabilność czystych hormonów (Eksperyment A)

W kolbie okrągłodennej umieszczono 2,5 mL bazowego roztworu (E2 lub EE2, lub P) i wodę destylowaną (97,5 mL). Całość ogrzewano do wrzenia pod chłodnicą zwrotną przez 180 minut, po czym ochłodzono do temperatury pokojowej. Następnie odparowano rozpuszczalnik w temperaturze 60°C, stosując wyparkę rotacyjną. Po całkowitym odparowaniu wody (60 min), pozostałość rozpuszczono w MeOH (2 x 1mL) i przeniesiono do fiolki w celu wykonania liofilizacji (65°C, 7 h). Otrzymane próbki (E2-1, EE2-1, P-1) rozpuszczono w deuterowanym DMSO-d₆ (1 mL) i zarejestrowano widma ¹H NMR (rys. 9.4a-c).

Badanie wpływu pH i podwyższonej temperatury na stabilność czystych hormonów (Eksperyment B)

W kolbie okrągłodennej umieszczono 2,5 mL bazowego roztworu (E2 lub EE2, lub P), wodę destylowaną (97,5 mL) oraz 50 μ L 25% roztworu kwasu siarkowego (VI). Całość ogrzewano do wrzenia pod chłodnicą zwrotną przez 180 minut, po czym ochłodzono do temperatury pokojowej. Następnie odparowano rozpuszczalnik w temperaturze 60°C, stosując wyparkę rotacyjną. Po całkowitym odparowaniu wody (60 min), pozostałość rozpuszczono w MeOH (2 x 1mL) i przeniesiono do fiolki w celu wykonania liofilizacji (65°C, 7 h). Otrzymane próbki (E2-2, EE2-2, P-2) rozpuszczono w deuterowanym DMSO-d₆ (1 mL) i zarejestrowano widma ¹H NMR (rys. 9.4d-f).

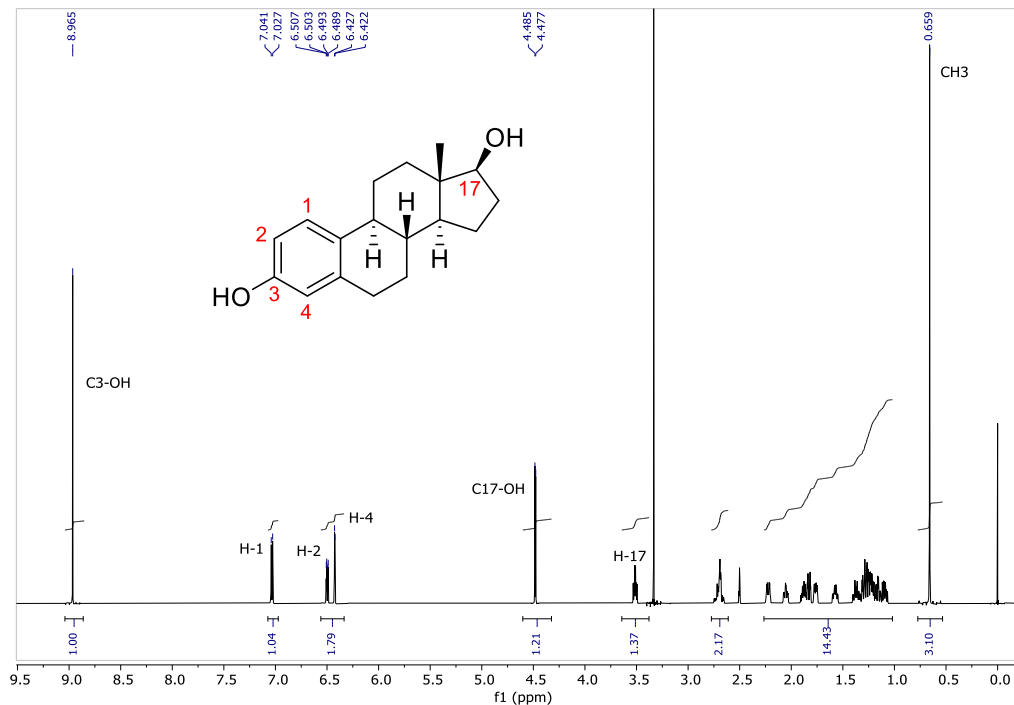
9.4.3. Wyniki i ich omówienie

Na rysunkach 9.1–9.3 przedstawiono widma ^1H NMR wzorców: 17β -estradiolu, 17α -etynyloestradiolu i progesteronu. Widma uzyskane dla roztworów hormonów inkubowanych przez 3 h w temperaturze 100°C oraz zakwaszonych (przez dodatek H_2SO_4) zaprezentowano na rysunku 9.4. Charakterystyka spektroskopowa jest następująca:

^1H NMR 17β -estradiolu (E2; 600 MHz, $\text{DMSO-d}_6/\text{TMS}$): δ_{H} 8.97 (1H, s, C3-OH), 7.03 (1H, d, J 8.4 Hz, H-1), 6.50 (1H, dd, J_1 5.4 Hz, J_2 2.4 Hz, H-2), 6.42 (1H, d, J 3.0 Hz, H-4), 4.48 (1H, d, J 4.8 Hz, C17-OH), 3.51 (1H, m, H-17), 2.71 – 1.15 (15H, m, CH_2 , CH), 0.66 (3H, s, CH_3) ppm.

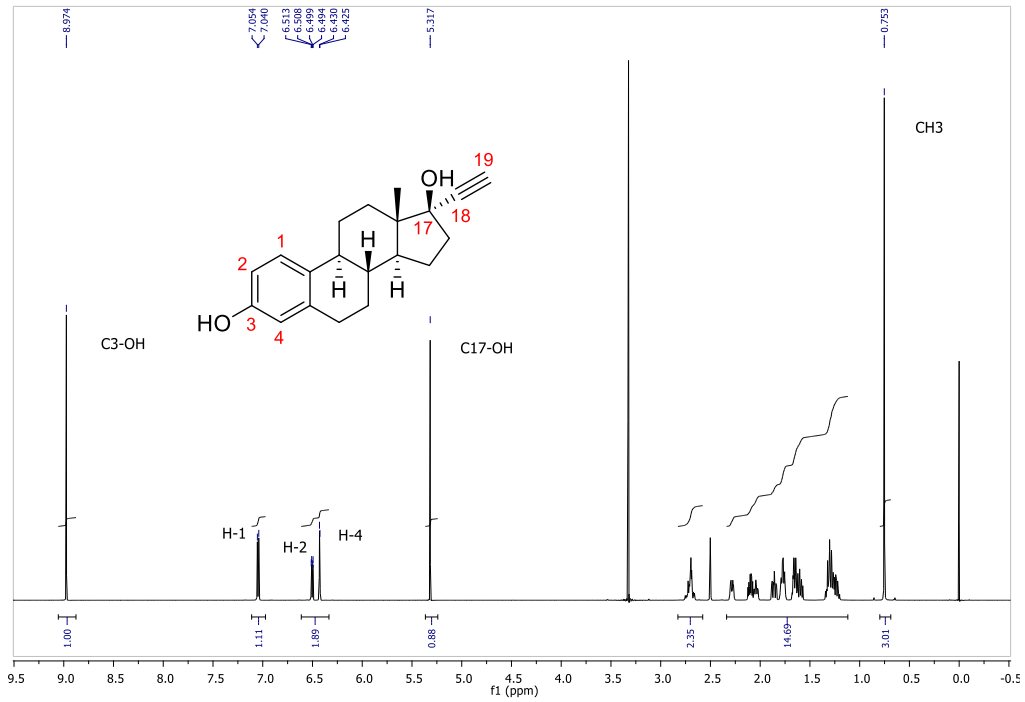
^1H NMR 17α -etynyloestradiolu (EE2; 600 MHz, $\text{DMSO-d}_6/\text{TMS}$): δ_{H} 8.97 (1H, s, C3-OH), 7.05 (1H, d, J 8.4 Hz, H-1), 6.50 (1H, dd, J_1 8.4 Hz, J_2 3.0 Hz, H-2), 6.43 (1H, d, J 3.0 Hz, H-4), 5.32 (1H, s, C17-OH), 2.72–1.24 (16H, m, $\equiv\text{CH}$, CH_2 , CH), 0.75 (3H, s, CH_3) ppm.

^1H NMR progesteronu (P; 600 MHz, $\text{DMSO-d}_6/\text{TMS}$): δ_{H} 5.63 (1H, s, H-4), 2.58 – 0.92 (20H, m, CH_2 , CH), 2.06 (3H, s, $\text{CH}_3(\text{CO})$), 1.14 (3H, s, CH_3 (19)), 0.57 (3H, s, CH_3 (18)) ppm.

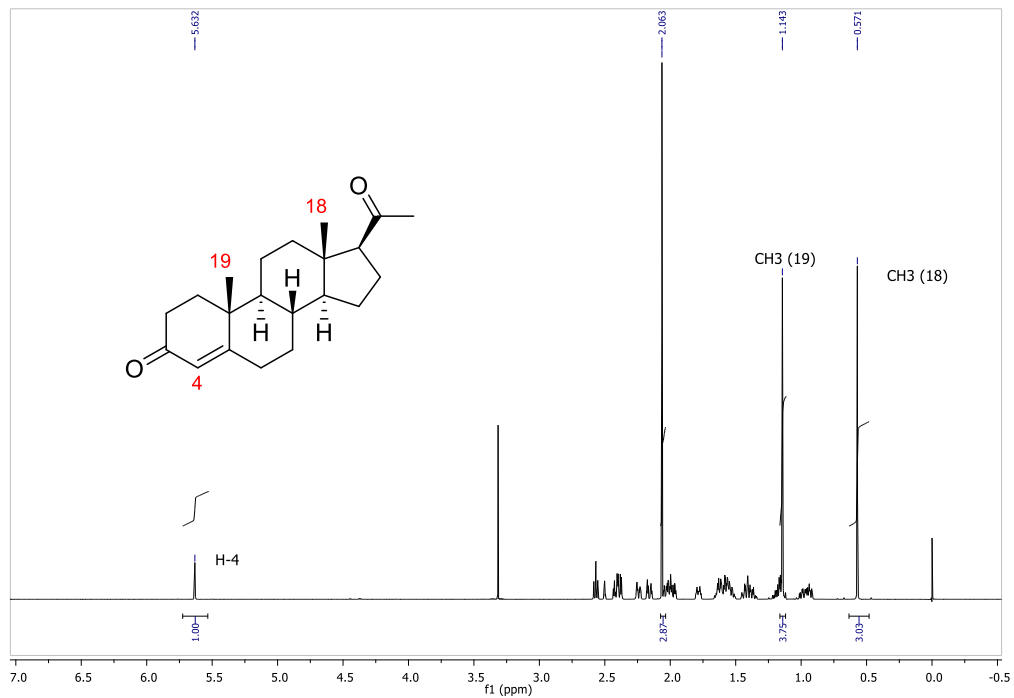


Rys. 9.1. Widmo ^1H NMR 17β -estradiolu (E2); 600 MHz, $\text{DMSO-d}_6/\text{TMS}$, δ (ppm)

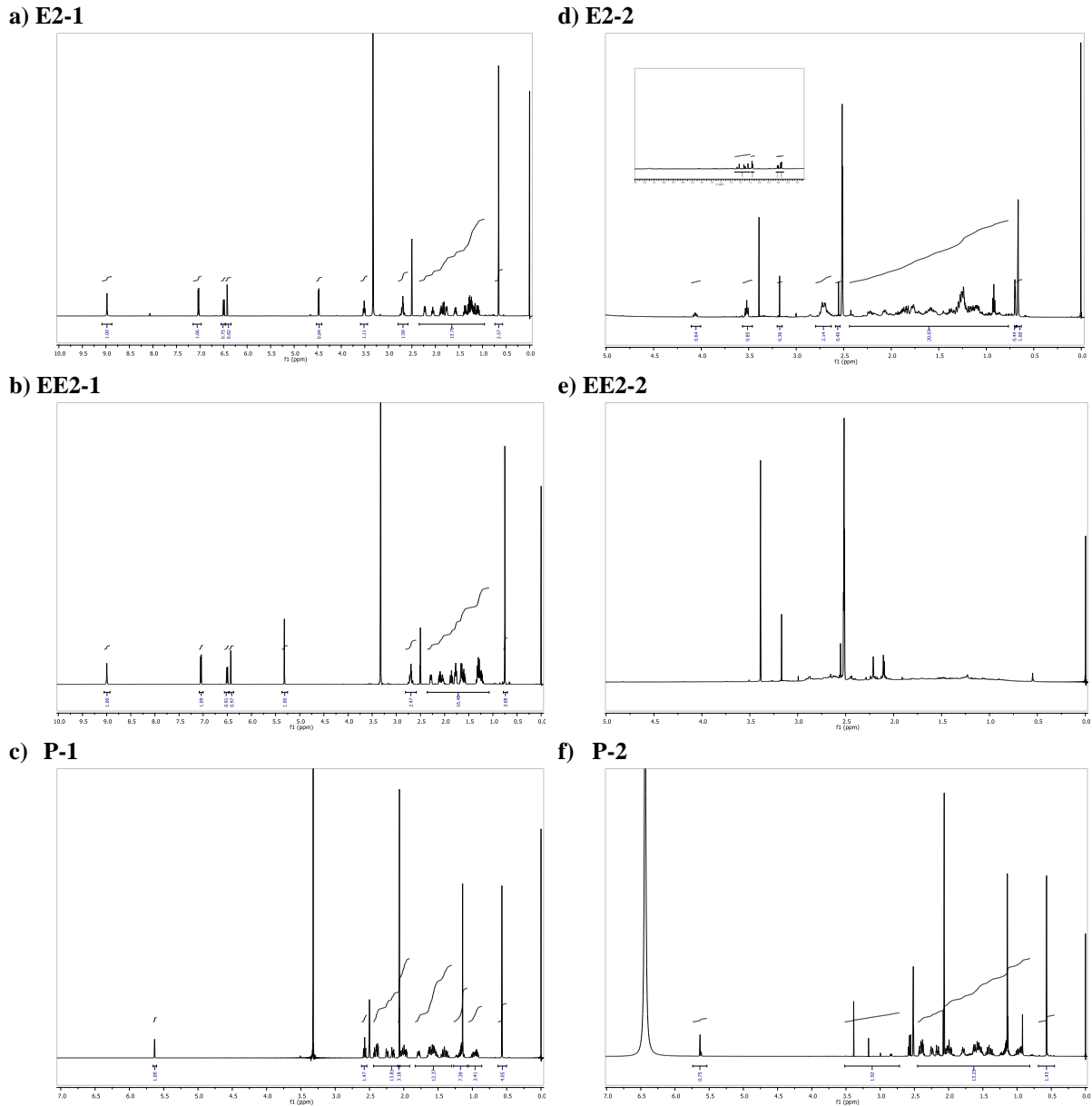
Fig. 9.1. ^1H NMR spectrum of 17β -estradiol (E2); 600 MHz, $\text{DMSO-d}_6/\text{TMS}$, δ (ppm)



Rys. 9.2. Widmo ^1H NMR 17 α -etyloestradiolu (EE2); 600 MHz, DMSO- d_6 /TMS, δ (ppm)
 Fig. 9.2. ^1H NMR spectrum of 17 α -ethinylestradiol (EE2); 600 MHz, DMSO- d_6 /TMS, δ (ppm)



Rys. 9.3. Widmo ^1H NMR progesteronu (P); 600 MHz, DMSO- d_6 /TMS, δ (ppm)
 Fig. 9.3. ^1H NMR spectrum of progesterone (P); 600 MHz, DMSO- d_6 /TMS, δ (ppm)



Rys. 9.4. Wpływ warunków zateżenia próbki na stabilność 17β-estradiolu, 17α-etynyloestradiolu i progesteronu. Widma ¹H-NMR (600 MHz, DMSO-d₆/TMS): a) roztwór 17β-estradiolu (50 μg E2/mL) ogrzewano w temp. 100°C przez 3 h; b) roztwór 17α-etynyloestradiolu (50 μg EE2/mL) ogrzewano w temp. 100°C przez 3 h; c) roztwór progesteronu (50 μg P/mL) ogrzewano w temp. 100°C przez 3 h; d) do roztworu 17β-estradiolu (50 μg E2/mL) dodano (50 μL 25% H₂SO₄), następnie ogrzewano w temp. 100°C przez 3 h; e) do roztworu 17α-etynyloestradiolu (50 μg EE2/mL) dodano (50 μL 25% H₂SO₄), następnie ogrzewano w temp. 100°C przez 3 h; f) do roztworu progesteronu (50 μg P/mL) dodano (50 μL 25% H₂SO₄), następnie ogrzewano w temp. 100°C przez 3 h.

Fig. 9.4. Effect of sample concentration conditions on the stability of 17β-estradiol, 17α-ethinyloestradiol and progesterone. ¹H-NMR spectra (600 MHz, DMSO-d₆/TMS): a) 17β-estradiol solution (50 μg E2/mL) was heated at 100°C for 3 h; b) 17α-ethinyloestradiol solution (50 μg EE2/mL) was heated at 100°C for 3 h; c) progesterone solution (50 μg P/mL) was heated at 100°C for 3 h; d) to 17β-estradiol solution (50 μg E2/mL) was added (50 μL 25% H₂SO₄), then heated at temp. 100°C for 3 h; e) to 17α-ethinyloestradiol solution (50 μg EE2/mL) was added (50 μL 25% H₂SO₄), then heated at temp. 100°C for 3 h; f) to progesterone solution (50 μg P/mL) was added (50 μL 25% H₂SO₄), then heated at temp. 100°C for 3 h.

W widmach ^1H NMR próbek (E2-1, EE2-1, P-1, rys. 9.4a-c) poddanych ogrzewaniu, odparowaniu rozpuszczalnika i liofilizacji (*Eksperyment A*) nie zaobserwowano istotnych zmian w porównaniu z widmami wzorców (E2, EE2, P, rys. 9.1–9.3), co potwierdza stabilność badanych estrogenów i progesteronu w testowanych warunkach (podwyższona temperatura, pH obojętne).

W przypadku ogrzewania i liofilizacji zakwaszonych próbek estrogenów (*Eksperyment B*, rys. 9.4d-e) w widmach ^1H NMR pojawiły się nowe sygnały w obszarach 7.25–6.25 oraz 2.5–0.5 ppm. Ponadto zanikły sygnały grup hydroksylowych w pozycjach C-3 i C-17 (E2: przy 8.97 i 4.48 ppm; EE2: przy 8.97 ppm i 5.32 ppm). Powyższe zmiany sugerują, że hormony E2 oraz EE2 w podwyższonej temperaturze, w środowisku o obniżonym pH ulegają częściowej degradacji, co prawdopodobnie wynika ze zmian w obrębie grup hydroksylowych. Progesteron okazał się zdecydowanie mniej wrażliwy na działanie podwyższonej temperatury i zmiany pH, ponieważ w widmie ^1H NMR (rys. 9.4f) pojawiło się jedynie kilka nowych sygnałów o niewielkiej intensywności. Wynika to przypuszczalnie z braku w strukturze progesteronu grup łatwo ulegających modyfikacji (np. -OH).

Zastosowana metodyka pozwala zatem w sposób jednoznaczny zidentyfikować hormony w próbce uprzednio zateżonego roztworu, w temperaturze 100°C. Rezultat ten jest o tyle istotny, że mimo iż techniki wykrywania estrogenów są intensywnie rozwijane w ostatnich latach [27], to najczęściej stosowanym testom immunologicznym i enzymatycznym oraz metodom spektrometrii mas towarzyszą niepewności wyników i problemy techniczne. Wspomniane testy są bowiem obarczone problemami z dokładnością wyników m.in. ze względu na ograniczoną efektywność reakcji krzyżowych, ograniczoną selektywność przeciwciał. Z kolei, w przypadku popularnych metod chromatografii gazowej ze spektrometrią mas (GC-MS) nietłne właściwości estrogenów i progestagenów ograniczają czułość oznaczeń i sprawiają, że konieczne jest stosowanie dużych objętości próbek. Dodatkowo, oznaczenie siarczanowych i glukuronidowych pochodnych GC-MS wymaga uprzedniego rozkładu ich cząsteczek z udziałem glukuronidazy i sulfatazy, a następnie przeprowadzenie procesu derywatywacji próbki [10, 11], stąd ilościowe oznaczenie wolnych hormonów i koniugatów estrogenów jest złożone i czasochłonne. Z tej perspektywy zastosowanie metody magnetycznego rezonansu jądrowego (^1H NMR) po uprzednim zateżeniu próbki wydaje się rozsądną alternatywą, ze względu na możliwość jednoznacznej identyfikacji oznaczanych hormonów, a także możliwość obserwacji zmian strukturalnych hormonów na skutek ich degradacji pod wpływem

kontrolowanych parametrów zewnętrznych. Jej zastosowanie w przypadku glukuronidowych i siarczanowych pochodnych estrogenów wymaga jednak dalszych badań.

9.5. Podsumowanie

Przeprowadzone studia literaturowe oraz badania eksperymentalne pozwalają stwierdzić, że wolne żeńskie hormony płciowe są stabilne termicznie w stosunkowo szerokim zakresie, tj. od poniżej -70°C do 100°C . Dzięki tej właściwości próbki zawierające żeńskie hormony gonadalne można zarówno mrozić, jak i poddawać wysokotemperaturowej obróbce, np. przez ich zatężanie przez odparowanie w 100°C , bez ryzyka ich degradacji. Z perspektywy doniesień literaturowych, trudniejsze wyzwanie stanowi jednak oznaczanie siarczanowych i glukuronidowych koniugatów estrogenowych w próbkach środowiskowych, ze względu na możliwość ich enzymatycznego rozkładu, którego efektywność zależy od temperatury i odczynu roztworu.

W przeprowadzonych badaniach korzystano z roztworów wzorcowych E2, EE2 i P w stosunkowo dużych stężeniach ($50\ \mu\text{g/mL}$), odpowiadających zakresowi czułości metody $^1\text{H NMR}$. Pokazano przy tym użyteczność tej metody w kontekście badania stabilności hormonów. Co istotne, widma $^1\text{H NMR}$ zawierają znaczną liczbę charakterystycznych elementów dla danej substancji (przesunięcia chemiczne sygnałów, ich całość, multipletowość oraz stałe sprzężenia dla każdej grupy protonów), dzięki czemu możliwa jest identyfikacja sygnałów pochodzących od określonych hormonów w sposób jednoznaczny, jak również ich odróżnienie od sygnałów innych substancji. Jest to o tyle istotne, że testy biochemiczne, często stosowane do wykrywania hormonów w próbkach analitycznych, zazwyczaj określają jedynie ogólną sumaryczną aktywność estrogenową. Zaletą metody $^1\text{H NMR}$ jest umożliwienie śledzenia zmian strukturalnych w cząsteczkach oznaczanych hormonów płciowych podczas ich degradacji w wyniku działania kontrolowanych czynników fizykochemicznych lub biochemicznych. Jest to istotne przede wszystkim z punktu widzenia poznania mechanizmów rozkładu hormonów w określonych warunkach i określenia ich produktów końcowych.

Uzyskane wyniki pokazały brak zmian strukturalnych w cząsteczkach E2, EE2 i P po 3 h inkubacji w temperaturze 100°C ich roztworów o obojętnym odczynie. Natomiast zakwaszenie próbek spowodowało częściową degradację estrogenów przez

zmiany strukturalne w obrębie grup hydroksylowych. Cząsteczki progesteronu nie uległy modyfikacji na skutek obniżenia pH roztworu. Uzyskane rezultaty sugerują możliwy wpływ pH na wiarygodność oznaczeń E2 i EE2. Zgodnie z pracą [9], w celu umożliwienia oznaczeń koniugatów estrogenowych zaleca się zakwaszenie próbek podczas ich przechowywania. Z perspektywy uzyskanych przez nas wyników, takie przygotowanie próbek do analizy może okazać się jednak niekorzystne, jeśli planowane są równoległe oznaczenia wolnych hormonów.

Interesującym kierunkiem dalszych badań jest rozszerzenie analiz przeprowadzonych w tej pracy o inne hormony i ich pochodne, a także sprawdzenie ich stabilności termicznej i wrażliwości na pH w wodach środowiskowych. Wykorzystanie próbek rzeczywistych stanowi przy tym podwójne wyzwanie, po pierwsze, ze względu na obecność mikroorganizmów i interferentów, po drugie, ze względu na niskie stężenia hormonów. Mała zawartość analitu w próbkach środowiskowych sprawia, iż zastosowanie metody ^1H NMR do identyfikacji związków wydaje się bardzo trudne technicznie do przeprowadzenia, ponieważ ze względu na ograniczenia czułości metody konieczne byłoby pobranie bardzo dużych objętości wód do analizy i przeprowadzenie ich wielokrotnego zatężania.

Podziękowania

Badania prowadzone były w ramach projektu Project Based Learning PBL pt. *Analiza wpływu wybranych hormonów obecnych w środowisku wodnym na poziom ekspresji akwaporyn i żywotność komórek ludzkich* (31/010/SDU20/0006-10).

Bibliografia

1. Yu W., Du B., Yang L., Zhang Z., Yang C., Yuan S., Zhang M.: Occurrence, sorption, and transformation of free and conjugated natural steroid estrogens in the environment. "Environmental Science and Pollution Research", Vol. 26, 2019, p. 9443–9468.
2. Shyu C., Cavileer T.D., Nagler J.J., Ytreberg F.M.: Computational estimation of rainbow trout estrogen receptor binding affinities for environmental estrogens, "Toxicology and Applied Pharmacology", Vol. 250, 2011, p. 322–326.
3. Kot-Wasik A., Jakimska A., Śliwka-Kaszyńska M.: Occurrence and seasonal variations of 25 pharmaceutical residues in wastewater and drinking water treatment plants. "Environmental monitoring and assessment", Vol.188(12), 2016, p.1–13.
4. Dudziak M., Luks-Betlej K.: Ocena obecności estrogenów - steroidowych hormonów płciowych - w wybranych wodach rzecznych w Polsce. „Ochrona Środowiska”, Vol. R26(1), 2004, p. 21–24.

5. Wojnarowski K., Podobiński P., Cholewińska P., Smoliński J., Dorobisz K.: Impact of estrogens present in environment on health and welfare of animals. "Animals", Vol. 11, 2021, p. 2152.
6. Bilal M., Barceló D., Iqbal H.M.: Occurrence, environmental fate, ecological issues, and redefining of endocrine disruptive estrogens in water resources. "Science of The Total Environment", Vol. 800, 2021, p. 149635.
7. Ma L., Yates S. R.: Dissolved organic matter and estrogen interactions regulate estrogen removal in the aqueous environment: A review. "Science of the Total Environment", Vol. 640, 2018, p. 529–542.
8. Lévesque É., Turgeon D., Carrier J.S., Montminy V., Beaulieu M., Bélanger A.: Isolation and characterization of the UGT2B28 cDNA encoding a novel human steroid conjugating UDP-glucuronosyltransferase. "Biochemistry", Vol. 40(13), 2001, p. 3869–3881.
9. Zhang J., Wan Y.P., Liu Z.H., Wang H., Dang Z., Liu Y.: Stability properties of natural estrogen conjugates in different aqueous samples at room temperature and tips for sample storage. "Environmental Science and Pollution Research", Vol. 29, 2022, p. 1–10.
10. Huang F., Karu K., Campos L.C.: Simultaneous measurement of free and conjugated estrogens in surface water using capillary liquid chromatography tandem mass spectrometry. "Analyst", Vol. 146, 2021, p. 2689–2704.
11. Liu Z.H., Hashimoto T., Okumura Y., Kanjo Y., Mizutani S.: Simultaneous analysis of natural free estrogens and their conjugates in wastewater by GC-MS. "CLEAN–Soil, Air, Water", Vol. 38, 2010, p. 181–188.
12. Yilmazv B., Kadioglu Y.: Determination of 17 β -estradiol in pharmaceutical preparation by UV spectrophotometry and high performance liquid chromatography methods, "Arabian Journal of Chemistry", Vol. 10, 2017, p. S1422–S1428.
13. Combalbert S., Hernandez-Raquet G.: Occurrence, fate, and biodegradation of estrogens in sewage and manure, "Applied Microbiology and Biotechnology", Vol. 86, 2010, p. 1671–1692.
14. Johnson A.C., Belfroid A., Di Corcia A.: Estimating steroid oestrogen inputs into activated sludge treatment works and observations on their removal from the effluent. "Science of the Total Environment", Vol. 256, 2000, p. 163–173.
15. Johnson A.C., Aerni H.R., Gerritsen A., Gibert M., Giger W., Hylland K., Wettstein F.E. i in.: Comparing steroid estrogen, and nonylphenol content across a range of European sewage plants with different treatment and management practices. "Water research", Vol. 39, 2005, p. 47–58.
16. Koh Y.K., Chiu T.Y., Boobis A.R., Scrimshaw M.D., Bagnall J.P., Soares A., Lester J.N. i in.: Influence of operating parameters on the biodegradation of steroid estrogens and nonylphenolic compounds during biological wastewater treatment processes. "Environmental Science & Technology", Vol. 43, 2009, p. 6646–6654.
17. Gomes R.L., Scrimshaw M.D., Lester J.N.: Fate of Conjugated Natural and Synthetic Steroid Estrogens in Crude Sewage and Activated Sludge Batch Studies, "Environmental Science & Technology", Vol. 43, 2009, p. 3612–3618.
18. Ma L., Yates S.R.: Degradation and metabolite formation of 17 β -estradiol-3-glucuronide and 17 β -estradiol-3-sulphate in river water and sediment. "Water Research", Vol. 139, 2018, p. 1–9.

19. Auriol M., Filali-Meknassi Y., Adams C.D., Tyagi R.D.: Natural and synthetic hormone removal using the horseradish peroxidase enzyme: temperature and pH effects. "Water research", Vol. 40, 2006, p. 2847–2856.
20. Tworoger S.S., Hankinson S.E.: Collection, processing, and storage of biological samples in epidemiologic studies: sex hormones, carotenoids, inflammatory markers, and proteomics as examples. "Cancer Epidemiology Biomarkers & Prevention", Vol. 15, 2006, p. 1578–1581.
21. Casey F.X., Larsen G.L., Hakk H., Šimůnek J.: Fate and transport of 17 β -estradiol in soil – water systems. "Environmental Science & Technology", Vol. 37, 2003, p. 2400–2409.
22. Shareef A., Angove M.J., Wells J.D., Johnson B.B.: Aqueous solubilities of estrone, 17 β -estradiol, 17 α -ethynylestradiol, and bisphenol A. "Journal of Chemical & Engineering Data", Vol. 51, 2006, p. 879–881.
23. Schicksnus T., Müller-Goymann C.C.: 17 β -Estradiol solubility in aqueous systems— influence of ionic strength, pH and adsorption to packaging material. "Archiv der Pharmazie", Vol. 333(Suppl 2), 2000, p. 66.
24. Neale P.A., Escher B.I., Schäfer A.I.: pH dependence of steroid hormone – organic matter interactions at environmental concentrations. "Science of the Total Environment", Vol. 407, 2009, p. 1164–1173.
25. Clara M., Strenn B., Saracevic E., Kreuzinger N.: Adsorption of bisphenol-A, 17 β -estradiol and 17 α -ethynylestradiol to sewage sludge. "Chemosphere", Vol. 5, 2004, p. 843–851.
26. Zhang J., Liu Z.H., Zhong S.S., Wang H., Caidan B., Yin H., Dang Z.: Strategy for effective inhibition of arylsulfatase/ β -glucuronidase to prevent deconjugation of sulfate and glucuronide conjugates in wastewater during sample collection and storage. "Science of the Total Environment", Vol. 703, 2020, p. 135536.

10. WYSTĘPOWANIE ANTYBIOTYKÓW REZERWOWYCH W ŚRODOWISKU WODNYM

10.1. Wprowadzenie

Odkrycie antybiotyków było wydarzeniem bezsprzecznie rewolucjonizującym współczesną medycynę. Ich wprowadzenie do praktyki klinicznej umożliwiło nie tylko terapię infekcji bakteryjnych, lecz także przeprowadzanie operacji chirurgicznych, transplantacji czy leczenie nowotworów [1]. Znalazły również zastosowanie w hodowli zwierząt, w profilaktyce zakażeń oraz jako promotory wzrostu, bez których produkcja na tak dużą skalę nie byłaby możliwa [2]. Rozpowszechnienie ich zużycia ma jednak także swoją negatywną stronę. Nadużywanie i niepoprawne usuwanie, a przez to przedostawanie się do środowiska doprowadziło do pojawienia się lekooporności wśród mikroorganizmów chorobotwórczych. Ograniczenie efektywności obecnych na rynku antybiotyków i trudności w otrzymaniu nowych związków skłoniły do wprowadzenia rozwiązań, mających na celu wydłużenie skuteczności ich działania [3]. W 2017 roku Światowa Organizacja Zdrowia (WHO) stworzyła system klasyfikacji AWaRe (ang. Access, Watch, Reserve), który dzieli leki przeciwdrobnoustrojowe pod względem wskazań. Do grupy Reserve, czyli antybiotyków rezerwowych, zaliczono te, które można uznać za preparaty „ostatniej szansy”, przeznaczone do zwalczania wyłącznie wielolekoopornych patogenów [4]. Monitoring środowiska pod kątem obecności tych substancji jest zatem jednym z kluczowych narzędzi, wspomagających oszacowanie ryzyka wystąpienia antybiotykoodporności, a co za tym idzie zagrożenia utraty skuteczności wybranego farmaceutyku.

10.2. Antybiotyki rezerwowe

10.2.1. Klasyfikacja WHO AWaRe

Preparaty z klasy Access są lekami pierwszego oraz drugiego rzutu, które oferują najlepszą możliwą wartość terapeutyczną, jednocześnie minimalizując ryzyko pojawienia się oporności na środki przeciwdrobnoustrojowe. Antybiotyki z listy Watch mają wyższy potencjał jej generowania i powinny być traktowane priorytetowo w wysiłkach związanych z rozważnym leczeniem zakażeń bakteryjnych. Jednak to kategoria Reserve stanowi ostatnią linię obrony, a ochrona wybranych substancji powinna stanowić główny cel narodowych planów przeciwdziałania oporności [5].

Do grupy antybiotyków rezerwowych zalicza się środki przeciwbakteryjne z różnych klas lub ich połączenia, także z dodatkiem inhibitorów enzymów bakteryjnych w przypadku antybiotyków β -laktamowych (karbapenemy, cefalosporyny) (tabela 10.1). Niektóre związki zostały zakwalifikowane wyłącznie w określonych formach podania leku [4].

Tabela 10.1

Zestawienie wszystkich przeciwdrobnoustrojowych leków określonych jako rezerwowe (AWaRe 2021)

Klasa	Związek/połączenie związków	Droga podania
Aminoglikozydy	Plazomycyna	nd
Karbapenemy	Imipenem-cylastatyna-relebaktam	nd
	Meropenem-waborbaktam	nd
Cefalosporyny III generacji	Ceftazydym-awibaktam	nd
Cefalosporyny V generacji	Fosamil ceftaroliny	nd
	Medokaril ceftobiproflu	nd
	Ceftolozam-tazobaktam	nd
Inne cefalosporyny	Cefiderokol	nd
Glikopeptydy	Dalbawancyna	nd
	Oritawancyna	nd
	Telawancyna	nd
Glicylocykliny	Tygecyklina	nd
Lipopeptydy	Daptomycyna	nd
Monobaktamy	Aztreonam	nd
	Karumonam	nd
Oksazolidynony	Linezolid	nd
	Tedizolid	nd

Penemy	Faropenem	nd
Pleuromutyliny	Lefamulina	nd
Polimyksyny	Kolistyna	Doustna, dożylna
	Polimyksyna B	Doustna, dożylna
Streptograminy	Chinuprystyna-dalfoprystyna	nd
Tetracykliny	Erawacyklina	nd
	Minocyklina	Dożylna
	Omadacyklina	nd
Pochodne kwasu fosfonowego	Fosfomycyna	Dożylna
Pochodne trimetoprimu	Iklaprim	nd

nd – nie dotyczy

10.2.2. Sytuacja oraz regulacje prawne w Polsce i Europie

Klasyfikacja WHO AWaRe jest narzędziem wspomagającym państwowe instytucje odpowiedzialne za monitorowanie zużycia leków antybakteryjnych oraz ocenę prawidłowego dysponowania nimi. W raporcie Europejskiej Sieci Monitorowania Konsumpcji Antybiotyków ESAC-Net z 2021 roku została ona wykorzystana w konstrukcji dodatkowego wskaźnika lekooporności mikroorganizmów [5]. W Rozporządzeniu Wykonawczym Komisji Unii Europejskiej 2022/1255 z dnia 19.07.2022 roku określone zostały środki lub grupy środków przeciwdrobnoustrojowych, które są zarezerwowane wyłącznie do leczenia niektórych infekcji u ludzi. Lista ta pokrywa się w większości z grupą antybiotyków rezerwowych. Równolegle wprowadzony został zakaz stosowania tych związków w leczeniu zwierząt [6]. W sprawozdaniu Komisji Europejskiej DG(SANTE) 2022-7608, stanowiącym przegląd i podsumowanie działań państw członkowskich Unii Europejskiej w przeciwdziałaniu oporności, podkreślono ograniczone stosowanie klasyfikacji AWaRe w planach narodowych. Tylko 8 krajów zaraportowało korzystanie z powyższej listy, 18 opowiedziało się za chęcią korzystania z niej dopiero w przyszłości [7].

W Narodowym Programie Ochrony Antybiotyków realizowanym w latach 2011–2020 oraz w Narodowym Programie Zdrowia na lata 2021–2025 opisane są źródła antybiotykooporności i rekomendacje dotyczące jej przeciwdziałania, bazując na zaleceniach polskich, europejskich i światowych. Nie ma w nich wyszczególnionych informacji o wpływie występowania tych substancji w środowisku

naturalnym na powyższe zjawisko, a w związku z tym informacji o konieczności monitorowania leków antybakteryjnych w Polsce [8, 9].

Temat relacji między obecnością w środowisku leków przeciwbakteryjnych a opornością mikroorganizmów poruszono w komunikacie „Strategiczne podejście Unii Europejskiej do substancji farmaceutycznych w środowisku” z dnia 11.03.2019 roku. Za braki w wiedzy dotyczące skutków występowania farmaceutyków w wodach i glebie odpowiadać ma ograniczony monitoring miejsc o istotnym oddziaływaniu na środowisko (np. narażonych na kontakt ze ściekami szpitalnymi). W wymienionym komunikacie podkreślona jest znacząca rola określenia stężeń substancji farmaceutycznych w środowisku w ocenie ryzyka środowiskowego i w podjęciu ukierunkowanych działań, w celu jego ograniczenia [10].

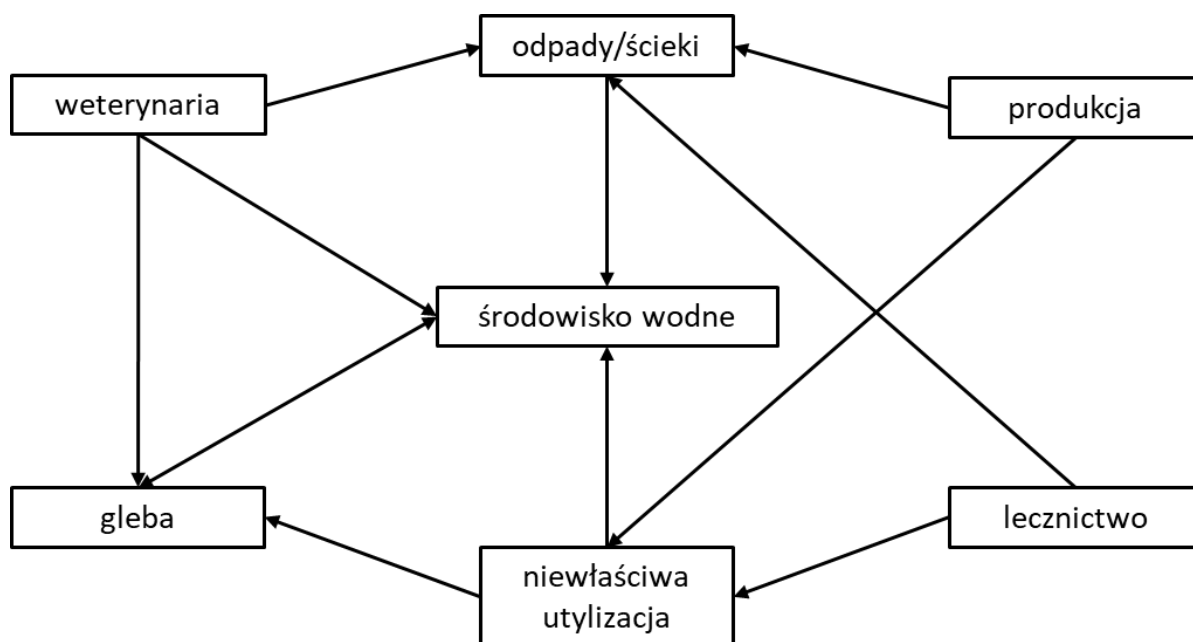
10.2.3. Źródła występowania antybiotyków rezerwowych w środowisku

Niezależnie od klasy leków antybakteryjnych drogi ich przedostawania się do środowiska są w większości takie same (rys. 10.1). Do głównych ośrodków emisji należą:

- ścieki i odpady komunalne oraz przemysłowe,
- weterynaria,
- niewłaściwa utylizacja leków.

Po spożyciu przez ludzi lub zwierzęta farmaceutyki najczęściej nie ulegają całkowitemu metabolizmowi i są częściowo wydalane w wyjściowej, aktywnej postaci. Konwencjonalne oczyszczalnie ścieków nie umożliwiają pełnego usunięcia leków, dlatego wraz z odpadami przemysłowymi ze szpitali oraz domostw przedostają się do środowiska. W rejonach rolniczych główną drogą wprowadzania do gleb jest nawożenie pól uprawnych obornikiem, pochodzącym od zwierząt, którym podawane są środki przeciwdrobnoustrojowe. Stamtąd związki przedostają się ze spływami do wód powierzchniowych i gruntowych. Również akwakultura jest bezpośrednim źródłem antybiotyków w środowisku wodnym. Szacuje się, że 30–60% wszystkich przepisanych antybiotyków może trafić do ścieków i przyczynić się do narastania oporności wśród mikroorganizmów. Badania wskazują, że niepełny metabolizm u ludzi i niewłaściwa utylizacja antybiotyków były głównymi źródłami uwalniania antybiotyków do środowiska na terenach miejskich [11].

Dodatkowo, w przypadku mobilnych związków, może dojść do ich przemieszczania się w środowisku, między różnymi jego sferami, gdzie ulegają biotycznej lub abiotycznej degradacji z wytworzeniem produktów transformacji [12].



Rys. 10.1. Źródła występowania i drogi dystrybucji leków przeciwdrobnoustrojowych w środowisku
Fig. 10.1. Sources of occurrence and ways of distribution of antimicrobials in the environment

Ograniczenia w stosowaniu leków z grupy antybiotyków rezerwowych u zwierząt nałożone przez Unię Europejską oraz zalecenia WHO, mające na celu zredukowanie ich zużycia wyłącznie do uzasadnionych przypadków, sugerują, że źródła wprowadzenia tych substancji do środowiska powinny ulec zminimalizowaniu. Biorąc pod uwagę powyższe obostrzenia, ośrodki emisji powinny być zredukowane głównie do odpływów ścieków szpitalnych. Jednakże w krajach bez restrykcyjnej polityki antybiotykowej zanieczyszczenie może przedostawać się wieloma drogami, a przy obecnych możliwościach podróżowania, mikroorganizmy odporne mogą bez problemu zostać przeniesione na duże odległości.

10.2.4. Metody oznaczania antybiotyków rezerwowych w ciekłych próbkach środowiskowych

Jak już wcześniej wspomniano, rezerwowe środki przeciwdrobnoustrojowe przedostają się do wód głównie ze ściekami szpitalnymi, ponieważ to w lecznictwie zamkniętym jest najwięcej przypadków infekcji wielolekoopornymi bakteriami [7], do których leczenia są przeznaczone. W przypadku niektórych preparatów ograniczenia

dotyczą tylko konkretnych dróg podania, stąd np. fosfomycyna jest dostępna w postaci granulatu do sporządzenia roztworu doustnego w aptekach ogólnodostępnych i stosowana w leczeniu otwartym [13]. Polimyksyna B wchodzi w skład maści, dostępnych w Polsce bez recepty (Tribiotic, Maxibiotic) [14, 15]. Inny przedstawiciel grupy Reserve – kolistyna jest dopuszczony do stosowania leczniczo u zwierząt. Mimo zaleceń ograniczania jej użycia, hodowle mogą być poważnymi źródłami zanieczyszczeń środowiska tym lekiem [16]. Przez wzgląd na powyższe informacje monitoring stężeń antybiotyków rezerwowych w wodach powinien być kluczową częścią oceny ryzyka pojawienia się opornych mikroorganizmów.

Podstawową techniką stosowaną w analizie substancji przeciwdrobnoustrojowych, w tym rezerwowych, w środowisku jest wysokosprawna chromatografia cieczowa sprzężona ze spektrometrią mas (HPLC-MS). Do jej zalet można zaliczyć: wszechstronność, możliwość zastosowania do analitów nielotnych i labilnych termicznie (w przeciwieństwie do chromatografii gazowej), możliwość zastosowania zarówno do oznaczania jakościowego, jak i ilościowego, do równoczesnego oznaczania wielu związków podczas jednej analizy, minimalizacja interferencji z metabolitami i innymi substancjami, wykrywanie nieznanymi metabolitów lub produktów degradacji, łatwa automatyzacja oraz zazwyczaj wysoka: selektywność, czułość i precyzja [17]. Anality rozdzielone chromatograficznie wprowadzane są do spektrometru mas przez źródło jonów. Jonizacja przez elektrorozpraszanie (ESI) jest rutynowo stosowana w analizie próbek pod kątem zawartości antybiotyków. ESI ma zastosowanie zarówno do związków polarnych, jak i niepolarnych, a także jest odpowiednią metodą do jonizacji substancji wrażliwych na ciepło. Analizatory mas wykorzystywane w oznaczaniu środków przeciwdrobnoustrojowych są zwykle konfigurowane w tandemie (MS/MS) w połączeniach typu potrójny kwadrupol. Taki układ pozwala na skanowanie jonów prekursorowych i fragmentacyjnych w trybie monitorowania wielokrotnych reakcji (MRM). W trybie MRM jon prekursorowy o określonym stosunku masy do ładunku (m/z) jest wybierany w pierwszym kwadrupolu tandemowego spektrometru mas. Następnie jest on fragmentowany przez wprowadzenie gazu kolizyjnego, takiego jak hel, azot lub argon oraz przyłożenie energii elektrycznej. Jeden z głównych jonów fragmentacyjnych jest wybierany przez drugi z analizatorów mas i przenoszony do detektora w celu oznaczenia ilościowego.

Próbki środowiskowe o złożonych matrycach zazwyczaj zawierają śladowe ilości analitów, stąd wymagają dodatkowych procesów dla uzyskania wiarygodnych danych podczas późniejszych analiz instrumentalnych. Podstawowym celem przygotowania próbki jest więc usunięcie źródeł interferencji, pochodzących z matrycy oraz

wydzielenie i zateżenie docelowych analitów [18]. Tabela 10.2 zawiera przykładowe procedury stosowane w przygotowaniu ciekłych próbek środowiskowych.

Tabela 10.2

Zestawienie procedur stosowanych do wydzielania antybiotyków rezerwowych z próbek wód

Analit	Matryca	Przygotowanie i analiza próbki	Lit.
Kolistyna Polimyksyna B	Woda z jeziora	<ul style="list-style-type: none"> - Filtracja (filtry 1 μm, 0,22 μm) - Doprowadzenie do pH 3 (6 M HCl) - Podzielenie na partie po 50 mL i zamrożenie (-80°C) - Liofilizacja - Rozpuszczenie pozostałości w 1 mL 0,1% FA w MeOH:0,1% FA w wodzie (80:20, V/V) - Analiza LC-MS/MS 	[19]
Ceftazydym Meropenem	Woda morską powierzchniowa	<ul style="list-style-type: none"> - zautomatyzowany proces SPE (złóże Atlantic HLB-M) - Odparowanie w strumieniu azotu - Rozpuszczenie pozostałości w 500 μL MeOH:woda (50:50, V/V) - Filtracja (filtr 0,2 μm) - Analiza LC/MS/MS 	[20]
Meropenem	Ścieki szpitalne	<ul style="list-style-type: none"> - Filtracja (filtr 0,1 μm) - Doprowadzenie do pH 2,4 - SPE (złóża LC-NH₂ i Oasis HLB w połączeniu) - Elucja 9 mL MeOH - Odparowanie w strumieniu azotu - Rozpuszczenie pozostałości w 0,9 mL MeOH - Analiza LC-MS/MS 	[21]
Meropenem	Ścieki	<ul style="list-style-type: none"> - Automatyczny system pobierania próbki - Rozcieńczenie próbki (1:1) woda:ACN (95:5, V/V) z 0,8 g/L EDTA - Filtracja (filtr 0,45 μm) - Analiza LC-MS/MS 	[22]
Linezolid	Woda rzeczna Ścieki	<ul style="list-style-type: none"> - Filtracja (filtr 0,7 μm) - SPE (złóże Oasis HLB) - Elucja 2 \times 4 mL MeOH - Odparowanie w strumieniu azotu - Rozpuszczenie pozostałości w 500 μL MeOH:woda (10:90, V/V) 	[23]

FA – kwas mrówkowy; MeOH – metanol; ACN – acetonitryl

Zwyczajowo stosowaną metodą przygotowania ciekłych próbek środowiskowych, tj. wód powierzchniowych, gruntowych czy ścieków, jest ekstrakcja do fazy stałej (SPE). Kolumny Oasis HLB są często używane zarówno do wydzielania związków polarnych, jak i niepolarnych, ponieważ zawierają lipofilowe grupy diwinylobenzenu i hydrofilowe grupy N-winylopirolidonu, które są wysoce stabilne w szerokim zakresie pH przygotowywanych próbek [18].

10.3. Podsumowanie

Obecnie prowadzone badania z zakresu otrzymania lub wprowadzenia na rynek nowych środków antibakteryjnych dotyczą w większości już istniejących klas leków lub ich modyfikacji. Ze względu na duże koszty finansowe wieloletnich badań i ryzyko niepowodzenia oraz nikłe szanse na otrzymanie antybiotyku o szerokim spektrum działania, ważna jest ochrona dostępnych substancji stosowanych w leczeniu infekcji bakteryjnych przed postępującą opornością mikroorganizmów [3]. Nowe mechanizmy pojawiają się w sposób ciągły, a rozprzestrzenianie się opornych bakterii jest w obecnych czasach coraz szybsze.

Poza monitorowaniem chorobotwórczych patogenów kluczowych i poziomów zużycia środków przeciwdrobnoustrojowych oraz edukacją społeczeństwa na temat skutków narastania lekooporności mikroorganizmów, konieczne jest również wdrożenie ciągłej kontroli stężeń antybiotyków „ostatniej szansy” w środowisku. Nie istnieją doniesienia, które by udowadniały, że obecność farmaceutyków w środowisku ma bezpośredni wpływ na zdrowie ludzi, jednak poważnym zagrożeniem jest rozwój opornych drobnoustrojów. Informacje o obecności któregoś z antybiotyków w dowolnym elemencie środowiska na danym obszarze byłyby idealnym wskaźnikiem do wczesnego ostrzegania przed możliwością pojawienia się i rozprzestrzenienia genów oporności. Działania ochronne powinny być długoterminowe i przebiegać na różnych poziomach, we współpracy z instytucjami rządowymi i jednostkami naukowymi.

Bibliografia

1. Hutchings M., Truman A., Wilkinson B.: Antibiotics: past, present and future. *Curr Opin Microbiol*, 51, 2019, p. 72–80.

2. Low C.X., Tan L.T.H., Mutalib N.S.A., et al.: Unveiling the impact of antibiotics and alternative methods for animal husbandry: A review. *Antibiotics*, 10, 2021, p. 1–17.
3. Kozińska A., Sitkiewicz I.: „Nowe” i „stare” antybiotyki – mechanizmy działania i strategię poszukiwania leków przeciwbakteryjnych. *Kosmos*, 66, 2017, p. 109–124.
4. WHO Model Lists of Essential Medicines. Reserve antibiotic group <https://list.essentialmeds.org/antibiotics/RESERVE> (dostęp 28.05.2023).
5. Antimicrobial consumption in the EU/EEA (ESAC-Net). Annual Epidemiological Report for 2021.
6. Rozporządzenie Wykonawcze Komisji Unii Europejskiej 2022/1255 z dnia 19.07.2022 r. określające środki przeciwdrobnoustrojowe lub grupy środków przeciwdrobnoustrojowych zarezerwowane do leczenia niektórych zakażeń u ludzi zgodnie z rozporządzeniem Parlamen. 2022.
7. Overview Report on the Review of Member States’ One Health National Action Plans Against Antimicrobial Resistance. DG(SANTE) 2022-7608. 2022.
8. Program polityki zdrowotnej “Narodowy program ochrony antybiotyków na lata 2016–2020.” 2016.
9. Narodowy Program Zdrowia na lata 2021-2025. Zadanie nr 6: Przeciwdziałanie powstawaniu antybiooporności u drobnoustrojów. Cel Operacyjny nr 4: Zdrowie środowiskowe i choroby zakaźne. 2021.
10. Komunikat Komisji do Parlamentu Europejskiego, Rady i Europejskiego Komitetu Ekonomiczno-Społecznego. Strategiczne podejście Unii Europejskiej do substancji farmaceutycznych w środowisku. COM(2019) 128 final. 2019.
11. García J., García-Galán M.J., Day J.W., et al.: A review of emerging organic contaminants (EOCs), antibiotic resistant bacteria (ARB), and antibiotic resistance genes (ARGs) in the environment: Increasing removal with wetlands and reducing environmental impacts. *Bioresour Technol*, 307, 2020, 123228.
12. Kummerer K.: Pharmaceuticals in the Environment. *Annu Rev Environ Resour*, 35, 2010, p. 57–75.
13. Preparaty lecznicze z fosfomycyną zarejestrowane do obrotu w Polsce <https://pharmindex.pl/> (dostęp 28.05.2023).
14. Charakterystyka produktu leczniczego. Tribiotic, maść.
15. Charakterystyka Produktu Leczniczego. Maxibiotic, maść.
16. Jansen W., Hout J. Van, Wiegel J., et al.: Colistin Use in European Livestock: Veterinary Field Data on Trends and Perspectives for Further Reduction. *Vet Sci*, 9, 2022, p. 1–14.
17. Peris-Vicente J., Peris-García E., Albiol-Chiva J., et al.: Liquid chromatography, a valuable tool in the determination of antibiotics in biological, food and environmental samples. *Microchem J*, 177, 2022, 107309.
18. Kim C., Ryu H., Chung E.G., et al.: A review of analytical procedures for the simultaneous determination of medically important veterinary antibiotics in environmental water: Sample preparation , liquid chromatography , and mass spectrometry. *J Environ Manage*, 217, 2018, p. 629–645.
19. Qiu J., Xiong R., Song X., et al.: Simultaneous Determination of Multiple Polypeptide Antibiotics Residues in Lake Water by Lyophilization Combined with Liquid Chromatography–Tandem Mass Spectrometry. *Anal Sci*, 37, 2021, p. 1687–1693.
20. Prekrasna I., Pavlovska M., Dzhulai A., et al.: Antibiotic Resistance in Black Sea Microbial Communities. *Front Environ Sci*, 10, 2022, p. 823172.
21. Le T.H., Ng C., Chen H., et al.: Occurrences and characterization of antibiotic-resistant bacteria and genetic determinants of hospital wastewater in a tropical country. *Antimicrob Agents Chemother*, 60, 2016, p. 7449–7456.

22. Voigt A.M., Zacharias N., Timm C., et al.: Association between antibiotic residues, antibiotic resistant bacteria and antibiotic resistance genes in anthropogenic wastewater – An evaluation of clinical influences. *Chemosphere*, 241, 2020, 125032.
23. Shigei M., Assayed A., Hazaymeh A., et al.: Pharmaceutical and Antibiotic Pollutant Levels in Wastewater and the Waters of the Zarqa River, Jordan. *Appl Sci*, 11, 2021, p. 1–12.

11. BETONY LEKKIE Z KRUSZYWEM Z MATERIAŁÓW ODPADOWYCH

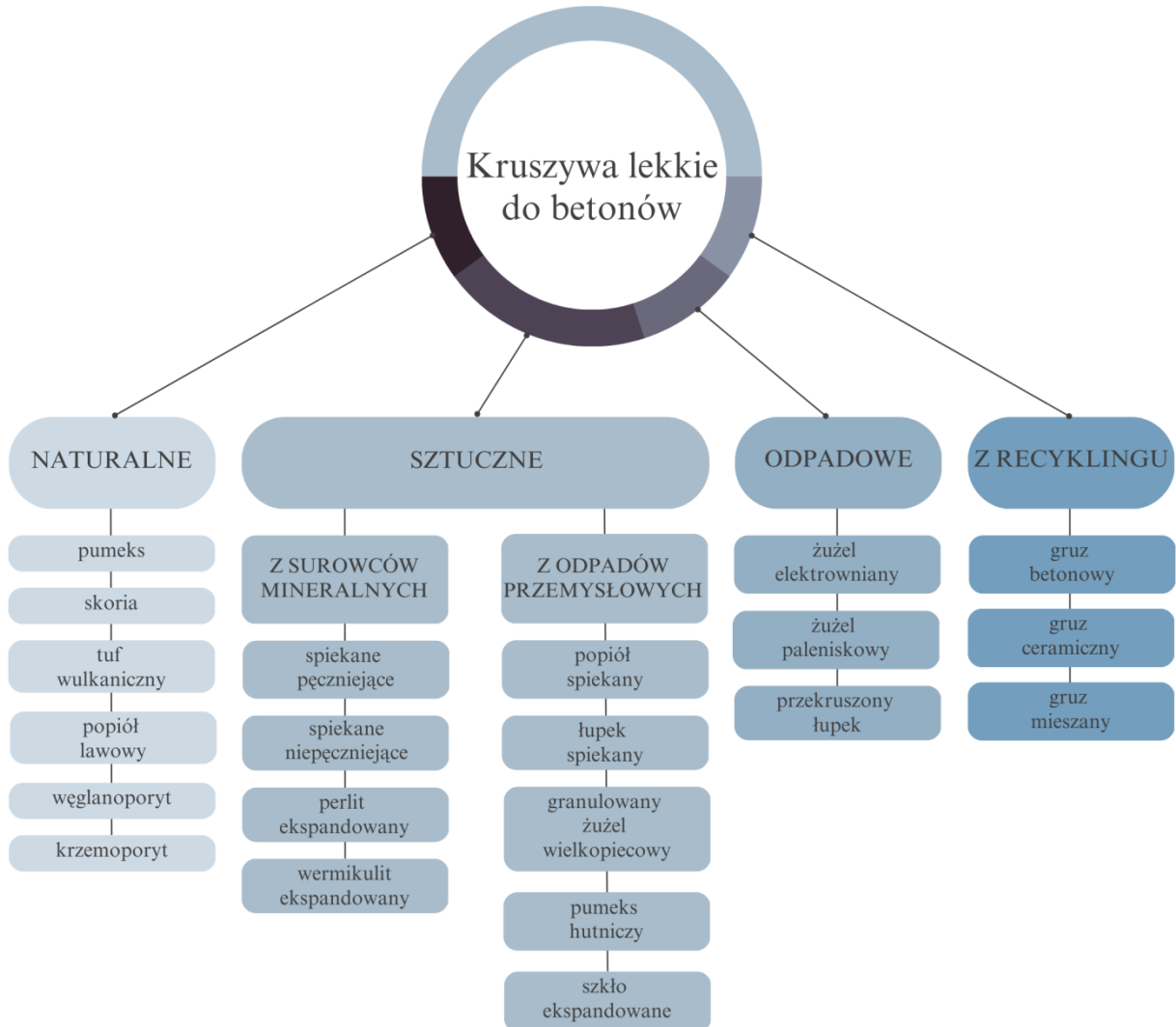
11.1. Wprowadzenie

Należy podkreślać, że terminy recycling, downcycling i upcycling to nie jest już moda, a konieczność, w szczególności w przemyśle materiałów budowlanych. Rozsądny inwestor czy producent zdaje sobie sprawę, że ilość surowców na naszej planecie zmniejsza się i od sposobu gospodarowania nimi zależy przyszłość kolejnych pokoleń. Budownictwo przyjazne środowisku naturalnemu i człowiekowi realizuje zasady zrównoważonego rozwoju przez oszczędzanie zasobów naturalnych i przeciwdziałanie zanieczyszczeniu gleby, powietrza i wody. Szerzej rozumując, promuje się również procesy technologiczne o zmniejszonej energochłonności i zmniejszonej ilości odpadów przez modernizację, zwiększenie efektywności technologii produkcji i zagospodarowanie czy utylizację odpadów. Zwraca się też uwagę na odzyskiwanie i powtórne wykorzystanie materiałów budowlanych, zastępowanie szkodliwych przyjaznymi dla środowiska materiałami i taki sposób składowania materiałów nieodnawialnych, aby zapewniał ochronę środowiska naturalnego. Zmierza się również w kierunku oceny obiektu budowlanego, w okresie jego cyklu życia technicznego, pod kątem zużycia nośników energii i wody. Z tymi zagadnieniami wiąże się również trwałość chemiczna, biologiczna, wytrzymałość i odporność wyrobów oraz materiałów budowlanych. Zwraca się uwagę na potrzebę wykonywania remontów, możliwość utylizacji materiałów po rozbiórce, a nawet sposób rekultywacji terenu po przedsięwzięciu budowlanym.

Celem tej pracy jest wskazanie na kruszywa z recyklingu, które można użyć do wykonania betonów lekkich, wraz z wybranymi badaniami betonów. Beton lekki charakteryzuje się tym, że jego gęstość wynosi mniej niż 2000 kg/m^3 . Aby otrzymać beton lekki można zastosować kruszywa lekkie albo przygotować tzw. beton komórkowy. Beton lekki cechuje się lepszą izolacyjnością.

Kruszywa lekkie stosowane na szerszą skalę zostały sklasyfikowane na rysunku 11.1 poniżej, pochodzącym z monografii L. Domagały [1]. W związku ze

specyficznymi właściwościami kruszyw lekkich, wpływ różnych czynników na beton lekki jest bardziej złożony niż w przypadku betonu zwykłego, praktycznie na każdym etapie [1].



Rys. 11.1. Podział lekkich kruszyw do betonów, według [1]

Fig. 11.1. Division of lightweight aggregates for concrete, acc to [1]

W badaniach betonu mającego służyć wykonaniu prefabrykowanych elementów budowlanych do wznoszenia ścian ważne jest sprawdzenie jego wytrzymałości, ale również przenikalności ciepła. Przenikalność cieplną ścian określa współczynnik przenikania ciepła U , a parametr mający na niego wpływ to współczynnik przewodzenia ciepła λ [$W/(m \cdot K)$]. Oprócz spełnienia określonych wartości współczynników przenikania ciepła przegród budynku U (WT) jednocześnie należy spełnić wymagania, co do wskaźników zapotrzebowania na nieodnawialną energię pierwotną (EP). Te dwa rodzaje wymagań uzupełniają się i wchodzą w zakres

wymagań dotyczących efektywności energetycznej budynków, wg EPBD 2018/844 [2].

Wartość współczynnika przewodności cieplnej λ (zdolność materiału do przewodzenia ciepła) jest potrzebna, aby obliczyć współczynnik przenikania ciepła U . Przewodność cieplna materiału determinuje wielkość przepływu ciepła wywołanego różnicą temperatur po obydwu stronach warstwy materiału przegrody. Przedstawiając obrazowo, współczynnik przewodzenia ciepła mówi o ilości ciepła, jaka przepływa przez warstwę materiału o grubości 1 m i powierzchni 1 m² przy różnicy temperatury 1 K, w czasie 1 s. Od stycznia 2021 roku obowiązują zmiany w zakresie dopuszczalnej wartości współczynnika U . Według nowych norm, jeśli temperatura pomieszczenia ogrzewanego jest większa lub równa 16°C, to maksymalna wartość współczynnika U może wynosić przykładowo dla dachów, stropodachów i stropów pod nieogrzewanymi poddaszami lub nad przejazdami – 0,15 W/(m²·K); dla ścian zewnętrznych – 0,20 W/(m²·K); podłóg na gruncie – 0,30 W/(m²·K); dla stropów nad pomieszczeniami nieogrzewanymi i zamkniętymi przestrzeniami podpodłogowymi – 0,25 W/(m²·K) [3]. Zatem, aby zaprojektować poszczególne przegrody budynku zgodnie z normami i obowiązującymi zasadami [2–4], trzeba znać wartości współczynnika przewodności cieplnej (λ) materiałów budowlanych oraz dobrać odpowiednio grubości projektowanych przegród. Inaczej można powiedzieć, że λ określa termoizolacyjność materiałów budowlanych. Im mniejsza jest wartość λ , tym lepsze właściwości izolujące ma dany materiał. Wartości współczynników przewodzenia można znaleźć w materiałach informacyjnych producentów i w normie PN-EN ISO 10456:2009 [5].

W PN-EN ISO 6946:2017-10 [6] podano metodę obliczania oporu cieplnego oraz współczynnika przenikania ciepła komponentów budowlanych i elementów budynku, z wyjątkiem drzwi, okien i innych elementów oszklonych, ścian osłonowych, komponentów, przez które ciepło jest przenoszone do gruntu oraz komponentów, przez które ma przenikać powietrze. Dla przegród budowlanych oblicza się opór przewodzenia ciepła w materiale przegrody $R_\lambda = d/\lambda$, gdzie d to grubość przegrody (warstwy). Dodatkowo należy uwzględnić opory przejmowania (wnikania) ciepła na zewnętrznej i wewnętrznej powierzchni (dla poziomego przepływu ciepła są stałe i wynoszą odpowiednio $R_{se}=0,04$ i $R_{si}=0,13$ (m²·K)/W, wg [6]). Całkowity opór przenikania ciepła przez przegrodę to suma wszystkich wymienionych oporów $R=R_\lambda+R_{se}+R_{si}$. Współczynnik przenikania ciepła to odwrotność oporu cieplnego przegrody. Można go obliczyć, podstawiając uzyskaną wartość R do wzoru $U=1/R$.

Głównym składnikiem oporu przenikania ciepła jest opór związany z przewodzeniem ciepła w przegrodzie budowlanej. Z kolei opór przewodzenia ciepła przegrody jest odwrotnie proporcjonalny do współczynnika λ przewodności cieplnej materiału przegrody. Jeżeli mamy przypadek przegrody wielowarstwowej (materiał konstrukcyjny, warstwa izolacji cieplnej itd.), wówczas, aby obliczyć całkowity opór przewodzenia dla przegrody należy sumować wszystkie opory cieplne warstw, z których składa się przegroda. W tym przypadku należy uwzględnić współczynniki przewodności cieplnej dla materiału każdej warstwy. Reasumując, biorąc pod uwagę aspekt minimalizacji strat ciepła z budynku, współczynnik przewodności cieplnej materiałów budowlanych jest zatem kluczowym parametrem decydującym o atrakcyjności zastosowania danego materiału do celów budownictwa.

Istnieje wiele metod pomiaru współczynnika przewodności cieplnej materiałów [7–11]. W każdej z nich wywołuje się zjawisko przepływu ciepła w badanym materiale, przy równoczesnym pomiarze różnych parametrów charakteryzujących proces przepływu ciepła. Ogólnie metody te można podzielić na metody ustalonego stanu cieplnego (ustalonego rozkładu temperatury w próbce) oraz nieustalonego stanu cieplnego (nieustalonego pola temperatury w badanej próbce).

Metody stanu ustalonego polegają na wytworzeniu w próbce ustalonego, najczęściej jednowymiarowego, pola temperatury, kiedy zachodzi spełnienie warunku $\partial T / \partial \tau = 0$. Prowadzi to (przy założeniu że współczynnik przewodzenia ciepła nie zależy od temperatury) do następującej zależności, określającej jego wartość:

$$\lambda = \frac{\dot{Q}}{A} \frac{\delta}{T_2 - T_1}, \quad (11.1)$$

gdzie:

\dot{Q} – strumień ciepła przepływający przez próbkę,

A – pole przekroju próbki,

T_1, T_2 – temperatury na obu powierzchniach płaskiej próbki o grubości δ .

Metody te charakteryzują się stosunkowo dużą dokładnością, jednak ich podstawowe wady to bardzo długi czas pomiaru (nawet do kilkunastu godzin) oraz trudności w utrzymaniu założonych, ustalonych warunków brzegowych na poszczególnych powierzchniach próbki. Do pomiaru współczynnika przewodzenia ciepła słabych przewodników ciepła najczęściej stosuje się metody płytowe, gdzie stosowane są grzejniki płaskie. Do tej grupy urządzeń należy aparat z tzw. osłoniętą płytą, stosowany do badań materiałów o niskiej przewodności cieplnej. Natomiast przewodność cieplna materiałów izolacyjnych sypkich lub kształtek może być też

wyznaczana w aparatach rurowych, gdzie wykorzystuje się promieniowy przepływ ciepła od grzejnika umieszczonego w osi badanej próbki.

Niestacjonarne metody pomiaru współczynnika przewodzenia ciepła opierają się na analizie nieustalonego pola temperatury w badanej próbce. Ich podstawową zaletą jest krótki czas pomiaru, jednak dokładność uzyskanych wyników może czasem budzić zastrzeżenia. Metody te wymagają jednak na ogół bardziej złożonego oprzyrządowania w porównaniu z metodami stanu ustalonego. Nieustalone pole temperatury jest zależne zarówno od wartości współczynnika przewodzenia ciepła, jak i ciepła właściwego materiału próbki. Obie te wielkości ujęte są we współczynniku a , nazywanym dyfuzyjnością cieplną materiału:

$$a = \frac{\lambda}{C_P \rho}, \quad (11.2)$$

gdzie:

C_P – ciepło właściwe przy stałym ciśnieniu,

ρ – gęstość materiału.

Wartość a wyznaczana jest z analizy zmian temperatury w próbce, w czasie pomiaru. Dla określenia wartości współczynnika przewodzenia ciepła λ wymagana jest więc znajomość lub wykonanie pomiaru ciepła właściwego C_P oraz gęstości materiału próbki ρ .

Wśród metod nieustalonego stanu rozkładu temperatury w pomiarze współczynnika dyfuzyjności cieplnej stosowane są często metody:

- stanu uporządkowanego,
- błysku.

Równanie przewodnictwa cieplnego w stanie nieustalonym opisuje równanie Fouriera, które dla przypadku jednowymiarowego przepływu ciepła ma postać:

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = a \frac{\partial^2 T}{\partial x^2}. \quad (11.3)$$

Formułując warunek brzegowy drugiego lub trzeciego rodzaju na brzegu próbki oraz warunek początkowy:

$$\tau = 0, \quad T(x, \tau) = T_p \quad (11.4)$$

z powyższego równania otrzymuje się rozwiązanie w postaci szeregu:

$$T(x) = \sum_{n=1}^{\infty} A_n U_n(x) \exp(-m_n \tau), \quad (11.5)$$

gdzie:

A_n – współczynniki stałe,

$U_n(x)$ – współczynniki zależne od geometrii,

m_n – współczynniki określające zmianę temperatury w czasie, wartości tych współczynników szybko rosną w kolejnych wyrazach szeregu.

Analiza powyższego równania pokazuje, że dość szybko wpływ kolejnych wyrazów szeregu (4) maleje i po pewnym okresie z dobrym przybliżeniem można ograniczyć się do jednego wyrazu. Wtedy z równania (4) otrzymujemy wzór (5) na temperaturę w danym punkcie:

$$T = A_1 U_1 \exp(-m_1 \tau). \quad (11.6)$$

Po obustronnym zlogarytmowaniu otrzymujemy zależność liniową pomiędzy $\ln(T)$ i czasem obserwacji τ . Okres, w którym zachodzi taka zależność nazywany jest stanem uporządkowanym. W tym stanie, na podstawie (5), możliwe jest wyznaczenie dyfuzyjności cieplnej badanego materiału, jak również współczynnika przewodności cieplnej. Istnieją tu różne konstrukcyjne rozwiązania przyrządów pomiarowych wykorzystujących tę metodę.

Powyższa metoda jest stosowana w przyrządzie Isomet używanym do pomiarów w niniejszej pracy.

Kolejną znaną metodą pomiaru przewodności cieplnej (dyfuzyjności cieplnej) w stanie nieustalonym jest metoda błysku, zwana też metodą Parkera [11]. Polega ona na intensywnym, krótkotrwałym opromieniowaniu (czas opromieniowania jest rzędu milisekund) jednej strony płaskiej próbki i rejestrowaniu zmian temperatury na drugiej stronie tej próbki. Proces ten jest bardzo szybki, ponieważ w całości zachodzi w czasie 2-3 sekund. Do opromieniowania próbki używane jest zwykle światło lasera, natomiast do rejestracji zmian temperatury detektor promieniowania podczerwonego. Ze względu na dużą szybkość procesu stosowane są bardzo szybkie detektory fotonowe wymagające w związku z tym schładzania do bardzo niskiej temperatury. Dlatego stosowane są tu systemy chłodzenia ciekłym azotem. W czasie pomiaru rejestrowany jest wzrost temperatury na tylnej powierzchni próbki aż do osiągnięcia jej wartości maksymalnej oraz czas narastania tej temperatury. Wielkości te są mierzone z wysoką dokładnością.

Współczynnik dyfuzyjności cieplnej wyznacza się z zależności:

$$a = 0,1388 \frac{L}{\tau_{0,5}}, \quad (11.7)$$

gdzie:

L – grubość próbki,

$\tau_{0,5}$ – czas osiągnięcia 50% maksymalnego przyrostu temperatury próbki.

Powyższe równanie otrzymuje się po rozwiązaniu równania (2) dla warunków pomiaru. Zaletą tej metody jest to, że nie jest tu potrzebny dokładny pomiar temperatury próbki spowodowany błyskiem laserowym. Wystarczy rejestrować zmiany sygnału pomiarowego z detektora, a następnie wyznaczyć wymieniony wyżej czas połówkowy $\tau_{0,5}$. Metoda ta nadaje się również do pomiarów przy bardzo wysokich wartościach temperatury, przekraczających nawet 2000°C, ponieważ badana próbka jest zawieszona we wnętrzu pieca, w którym następuje jej podgrzanie do wymienionej temperatury.

11.2. Badania

Próbki betonu do badań przygotowano na Wydziale Budownictwa PŚ. Do ich wykonania użyto wodę wodociągową, cement CEM I 52,5 R Turbo, kruszywo lekkie, nazywane tu głównym oraz dodatkowe frakcje wypełniaczy lub kruszyw: perlitu o granulacji 0,2–6 mm; granulatu gumowego SBR o granulacji 0,5–2 mm; korka zmielonego do granulacji 0,1–0,2 mm lub keramzytu o granulacji 4–10 mm. Przykładowy masowy skład mieszanek pokazano w tabeli 11.1, a skład procentowy zestawiono w tabeli 11.2.

Do mieszanki P1 dodano kruszywo z recyklingu o frakcjach 0,5–1 mm (513 gram) i 8–16 mm (290 gram), a do P2: 0,5–1 mm (513 gram) i 4–8 mm (290 gram). Mieszanki w serii B1 zawierały kruszywo o frakcjach od 0,063 mm do 16 mm, natomiast B2 i B3 od 0,063 mm do 4 mm. W mieszance M1 było kruszywo o frakcjach z zakresu 0,125–16 mm. Kruszywo z recyklingu nie zostało wcześniej nasączone. Dodatki do kruszywa zostały dodawane wraz z głównym kruszywem (z recyklingu).

Użyty cement portlandzki CEM I Turbo 52,5R, charakteryzujący się wysoką dynamiką narastania wytrzymałości wczesnej, po 28 dniach osiąga wytrzymałość na poziomie 65 MPa. Kruszywo główne było samodzielnie przygotowane z odpadów budowlanych, o gęstości 550–600 kg/m³ i deklarowanej przez producenta $\lambda=0,16$ W/(m·K).

Tabela 11.1

Skład masowy badanych betonów

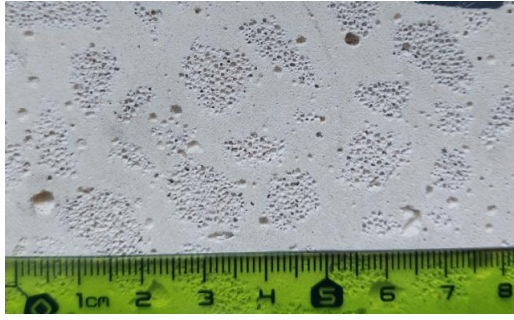
Składnik	Nazwa mieszanki i zawartość składników [g]							
	P1	P2	M1	B1.1	B1.2	B1.3	B2.1	B3.1
Woda	420	350	600	610	630	590	580	620
Cement	350	350	350	350	350	350	350	350
Kruszywo główne	803	803	520	800	800	800	520	556
Kruszywo dodatek	-	-	170 Perlit	-	35 Korek	5 SBR	280 Keramzyt	140 Perlit

Tabela 11.2

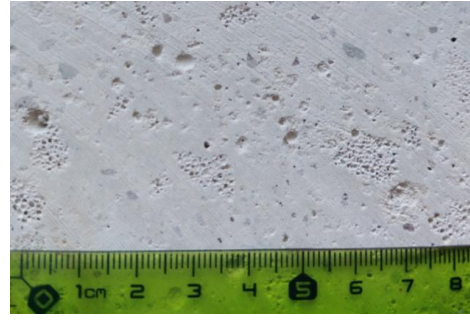
Skład procentowy (mas.) badanych betonów

Składnik	Nazwa mieszanki i zawartość składników [%]							
	P1	P2	M1	B1.1	B1.2	B1.3	B2.1	B3.1
Woda	26,7	23,3	36,6	34,7	34,7	33,8	33,5	37,2
Cement	22,3	23,3	21,3	19,9	19,3	20,1	20,2	21,0
Kruszywo główne	51,0	53,4	31,7	45,5	44,1	45,8	30,1	33,4
Kruszywo dodatek	-	-	10,4 Perlit	-	1,9 Korek	0,3 SBR	16,2 Keramzyt	8,4 Perlit

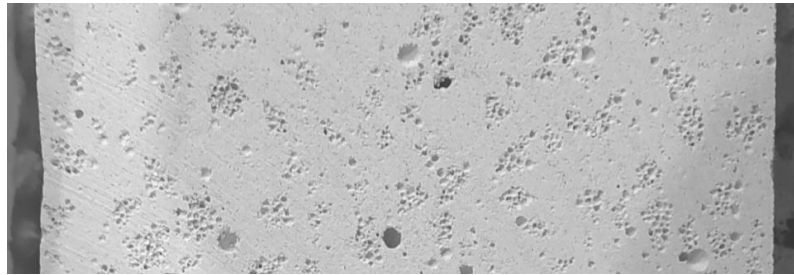
Uformowano po 3 kostki betonowe z każdej mieszanki o wymiarach 10×10×10 cm. Na zdjęciach (rys. 11.2) pokazano płaszczyzny przekroju stwardniałych próbek betonowych. Kruszywo główne jest ukazane jako silnie porowate i obecne we wszystkich próbkach. Jedynie kruszywo jest w próbkach P1, P2 i B1.1. Perlit jako dodatkowe kruszywo jest w próbkach M1 i B3.1 i widoczny jako małe ciemnoszare plamki. Korek o bardzo małej frakcji w B1.2 spowodował zmianę koloru matrycy cementowej z szarej na beżową. Dobrze widoczne są granulaty gumowy w B1.3 i keramzyt w B2.1.



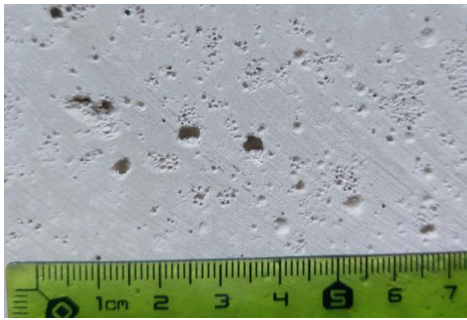
P1



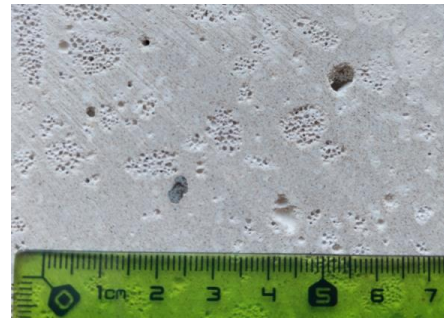
M1



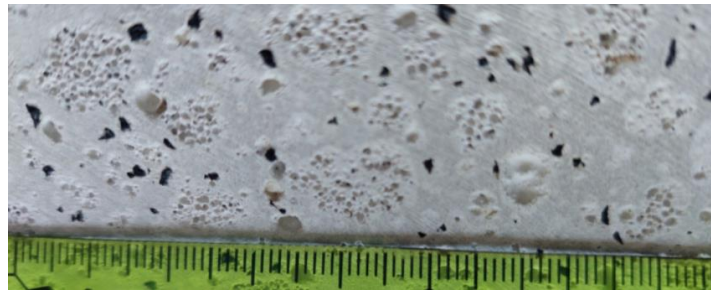
P2 (na zdj. szerokość próbki: 10 cm)



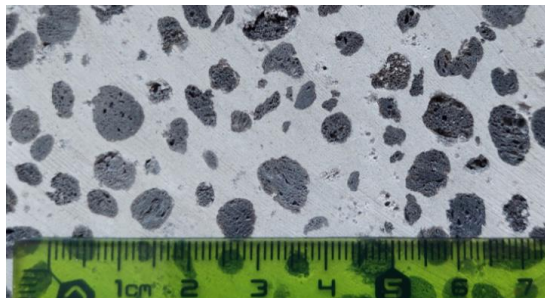
B1.1



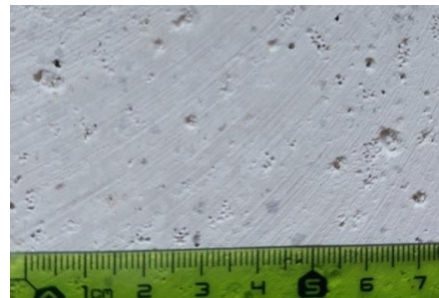
B1.2



B1.3



B2.1



B3.1

Rys. 11.2. Zdjęcia przekrojów próbek betonu lekkiego
 Fig. 11.2. Photos of sections of lightweight concrete samples

11.2.1. Badania wytrzymałości na ściskanie w porównaniu z zawartością wody zarobowej w mieszance betonu

Tabela 11.3 zawiera zestawienie wytrzymałości na ściskanie kostek betonowych po 28 dniach dojrzewania, wyrażoną w MPa. Wytrzymałość badano w maszynie wytrzymałościowej firmy Controls na Wydziale Budownictwa PŚ. Podano wszystkie trzy wartości wytrzymałości i obliczono średnią wartość z wszystkich trzech, bez odrzucania wyników o większej rozbieżności.

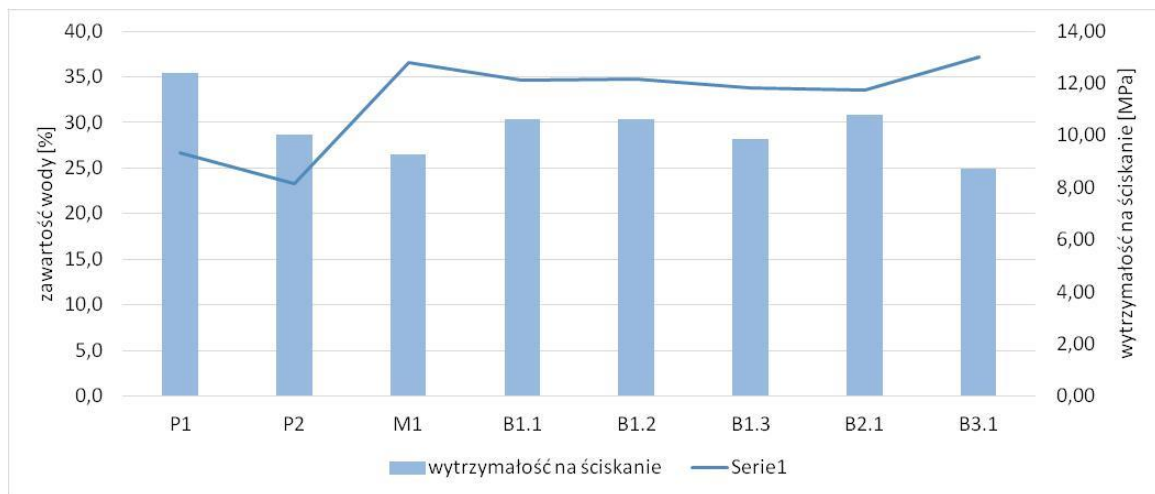
Największą wytrzymałość miała próbka stwardniałego betonu o nazwie mieszanki P1, natomiast najmniejszą próbka stwardniałego betonu o nazwie mieszanki B3.1 z 8,4% zawartością perlitu i największym udziałem wody. Można również zauważyć, że modyfikacja składu B1.1 o dodatek korka nie wpłynęła na wytrzymałość, ale zużyto większą ilość wody do uzyskania odpowiedniej urabialności tej mieszanki (B1.2). Natomiast modyfikacja składu B1.1 o dodatek granulatu gumowego spowodowała obniżenie wytrzymałości o około 7%; korzystne jest jednak to, że została nieznacznie zredukowana ilość wody zarobowej w tej mieszance (B1.3). Użycie keramzytu (B2.1) jako dodatku do kruszywa pozwoliło na uzyskanie wytrzymałości z zakresu 10–11 MPa, co kwalifikuje ją w grupie: P2, B1.1 i B1.2. Jeśli natomiast chodzi o sposób niszczenia betonów lekkich, pod wpływem sił ściskających, trzeba wspomnieć o tym, że jest całkiem inny niż betonów zwykłych. Betony zwykłe (na kruszywie naturalnym na przykład) zarysowują się pod wpływem siły ściskającej. W betonach lekkich natomiast rozkład naprężeń (pod obciążeniem) jest bardziej równomierny, ponieważ wartości modułów sprężystości kruszywa i matrycy cementowej są zbliżone. Dlatego też elementy z lekkich betonów w konstrukcji mogą pracować do znacznego stopnia wyężenia (nawet 90%-wego) w stanie niezarysowanym, wg [1]. Podczas badań wytrzymałości na ściskanie betonów wykonanych na potrzeby tej pracy można potwierdzić, że zaobserwowany został opisany sposób zniszczenia „bez zarysowania”.

Tabela 11.3

Wytrzymałość na ściskanie próbek 10×10×10 cm

Numer kostki	Nazwa mieszanki i jej wytrzymałość, MPa							
	P1	P2	M1	B1.1	B1.2	B1.3	B2.1	B3.1
1	11,37	10,00	8,75	9,44	10,07	10,99	10,95	9,08
2	12,92	9,75	9,32	11,62	10,23	10,06	10,80	8,13
3	12,95	10,38	9,70	10,86	11,57	8,58	10,63	8,99
Wartość średnia	12,41	10,04	9,25	10,64	10,62	9,88	10,79	8,73

Na rysunku 11.3 przedstawiono średnie wartości wytrzymałości na ściskanie w porównaniu z masowym udziałem wody zarobowej w mieszance. Można zauważyć, że zależności te kształtują się różnie, co wynika z właściwości kruszywa. Z reguły w betonach zwykłych duża zawartość wody wpływa na obniżenie wytrzymałości, ale to nie musi korespondować z betonami lekkimi. W betonach lekkich woda może być silnie sorbowana przez porowate kruszywo lub dodatek, przez co nawet przy dużych jej ilościach może jej zabraknąć do zajścia pełnych procesów hydratacji cementu. W analizowanym przypadku ewidentnie widać, że najmniejszą wytrzymałość miały betony z mieszanek M1 i B3.1 z perlitem i największym udziałem wody zarobowej.



Rys. 11.3. Wartości wytrzymałości na ściskanie kostek betonowych i ilości wody zarobowej
 Fig. 11.3. The values of the compressive strenght of the concrete cubes and the amount of mixing water

11.2.2. Badania gęstości objętościowej betonu

Stwardniałe mieszanki betonu poddano również badaniom gęstości objętościowej potrzebnej do dalszych obliczeń parametrów termicznych. Gęstość objętościową badano metodą grawimetryczną i mierząc geometrię próbek suwmiarką. W tabeli 11.4 zestawiono wartości gęstości objętościowych kostek betonowych w stanie naturalnym, w 28 dniu od wykonania oraz gęstości objętościowej próbek wysuszonych w temperaturze 75°C do stałej masy, w specjalistycznej suszarce do materiałów budowlanych.

Ubytek masy spowodowany wyparowaniem wody wynosił od 10 do 30%. Po czasie suszenia próbki przechowywano w pokoju laboratoryjnym, w którym wilgoć z powietrza wynosiła około 44% i zasorbowana została przez materiał. Dlatego gęstość próbek została ponownie sprawdzona w chwili badania przewodności cieplnej.

Gęstość objętościowa próbek 10×10×10 cm

Gęstość kg/m ³	Nazwa mieszanki							
	P1	P2	M1	B1.1	B1.2	B1.3	B2.1	B3.1
przed suszeniem	1506	1509	1022	1149	1193	1222	1073	1116
po suszeniu	-	-	901	975	966	960	875	896
w trakcie badania przewodności	1079	1076	912	1039	1022	1047	924	928

11.2.3. Badania przewodności cieplnej betonu

Badania przewodzenia ciepła wykonano z użyciem aparatu Isomet model 2104 firmy Applied Precision (rys. 11.4) w Katedrze Techniki Ciepłej Politechniki Śląskiej. Każda próbka o powierzchni 100/100 mm i grubości 30–70 mm była badana czujnikiem o zakresie pomiarowym λ : 0,04–0,3 (W/m·K).

Prowadzone badania były badaniami wstępnymi, które wykonywano z dwukrotnym lub trzykrotnym powtórzeniem. Badany beton był wstępnie wysuszony w suszarce, nie zawierał nadmiarowej wody zarobowej, która mogła być zabsorbowana przez porowate kruszywo lekkie lub wypełniacze. Następnie, przez 4 tygodnie próbki były przechowywane w laboratorium, więc cechowały się wilgotnością zaabsorbowaną z powietrza.



Rys. 11.4. Aparat do badania przewodności cieplnej w trakcie pomiaru

Fig. 11.4. The apparatus used to test thermal conductivity during measurement

W tabeli 11.5 zestawiono parametry określające właściwości termiczne próbek. Lambda λ jest zbadanym, wyżej opisanym współczynnikiem przewodzenia ciepła, wyrażenie $Cp \cdot \rho$ to iloczyn ciepła właściwego i gęstości materiału, a oznacza dyfuzyjność cieplną materiału, natomiast Cp – ciepło właściwe.

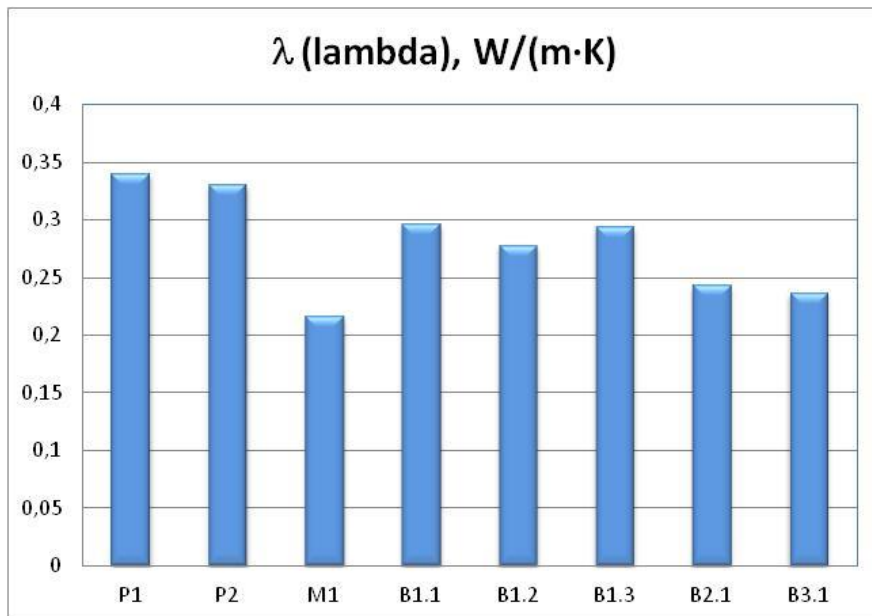
Najmniejszymi współczynnikami przewodzenia ciepła cechowały się próbki z mieszanek M1 i B3.1, a największymi próbki z mieszanek P1 i P2. W grupie mieszanek B1 – dodatek korka i granulatu gumowego obniżyły nieco lambda.

Tabela 11.5

Zbadane i obliczone parametry

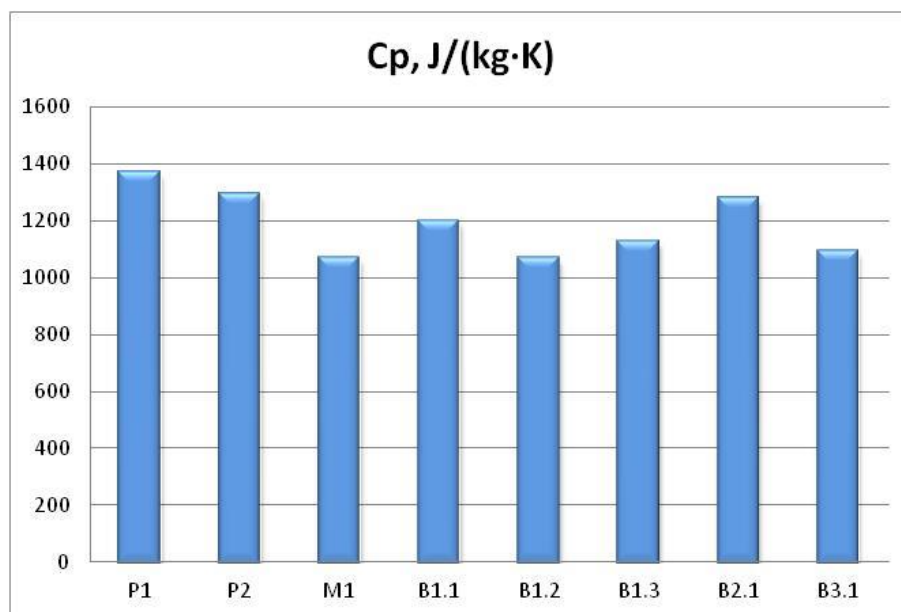
Parametr, jednostka	Nazwa próbki i wartości parametrów							
	P1	P2	M1	B1.1	B1.2	B1.3	B2.1	B3.1
λ , W/(m·K)	0,341	0,331	0,217	0,297	0,278	0,294	0,243	0,237
$Cp \cdot \rho$, J/(m ³ ·K ·10 ⁶)	1,470	1,388	0,970	1,240	1,085	1,175	1,175	1,009
a , m ² /(s ·10 ⁻⁶)	0,232	0,238	0,223	0,240	0,254	0,252	0,209	0,227
Cp , J/(kg·K)	1362	1290	1063	1194	1062	1122	1272	1087

Na rysunkach 11.5 i 11.6 zestawiono uśrednione wartości zmierzonych współczynników λ i ciepła właściwego wykonanych betonów. Zależności między nimi są mniej więcej podobne, ale jednak inne w przypadku betonu wykonanego z mieszanki B2.1 z keramzytem. Wydaje się zatem, że keramzyt ma zwiększone właściwości izolujące, w porównaniu z kruszywami w pozostałych mieszankach. Ciepło właściwe bowiem stanowi o wartości energii, jaką należy dostarczyć lub odebrać ciału, aby zmienić temperaturę jednostki masy tego ciała o 1 K. Jest współczynnikiem pozwalającym określić skłonność ciała do łatwiejszej lub trudniejszej zmiany temperatury pod wpływem dostarczonego ciepła.



Rys. 11.5. Uśrednione wartości zmierzonej lambda przygotowanych betonów

Fig. 11.5. Average values of measured lambda of prepared concretes



Rys. 11.6. Uśrednione wartości obliczonego ciepła właściwego
 Fig. 11.6. Average values of the calculated specific heat

11.2.4. Analiza wyników badań

Przyglądając się uzyskanym wynikom, można przy okazji zobrazować, w jakich zakresach mieszczą się przykładowe wartości obliczeniowych współczynników przewodzenia ciepła lambda $[W/(m \cdot K)]$ – styropianu: 0,031–0,045; drewna: 0,12–0,18; płyty OSB: 0,13; cegły: 0,15–1,31; płyty k-g: 0,21–0,25; zwykłego betonu: 1–2; żelbetu: 2,3–2,5; szkła okiennego: 1; szkła zbrojonego: 1,15; marmuru: 3,5; wapienia: 1,1–2,3; stali nierdzewnej: 17–30 [5]. Wartości współczynnika lambda – obliczona i zmierzona – są zbliżone [7]. Pomierzone wartości współczynnika lambda dla betonów poddanych badaniom wynosiły od 0,35 do 0,5. Były więc dużo lepsze ze względu na izolacyjność niż betonu wykonanego ze zwykłego kruszywa. Najniższą wartość lambda uzyskano w przypadku betonu wykonanego z mieszanki M1, a następnie B3.1 i B2.1. Betony te cechowały się najmniejszą gęstością, najmniejszym udziałem kruszywa głównego, które w mniejszej ilości zastąpiono perlitem, a w większej – keramzytem. Cechowały się też najmniejszą wytrzymałością i największym udziałem wody.

Prawdopodobnie woda po wyparowaniu wskutek suszenia pozostawiła puste przestrzenie, które stanowiły większy opór dla przepływu ciepła. Zatem w następnym kroku chcielibyśmy sprawdzić wartości współczynników lambda przedstawionych w tej pracy zmodyfikowanych mieszanek betonów. Modyfikacji może być wiele, a jedną z nich jest użycie różnych kruszyw w jednej mieszance. Ważny jest również

stopień zawilgocenia i zdolność sorbowania wody przez beton. Jest to istotne dla określenia odpowiednich warunków środowiskowych, w których materiał może pracować i jak wpływa na wilgotność powietrza w pomieszczeniach zamkniętych.

Trzeba przy okazji przyznać, że betony lekkie są dość skomplikowanym materiałem badawczym, na które wpływa bardzo wiele czynników zewnętrznych, ale i wewnętrznych. Na pewno jednak ze względu na kruszywo o niższej niż tradycyjne wytrzymałości mają one mniejszą wytrzymałość jako materiał kompozytowy. Zakres zbadanych wytrzymałości na ściskanie wynosił 8,7–12,4 MPa. Próbując jednak przeanalizować wyniki, można przykładowo wskazać, że mała zawartość wody w P1 dała próbce dość dużą wytrzymałość, ale już zmniejszenie ilości wody w P2 obniżyło jej wytrzymałość, jakkolwiek równocześnie zmodyfikowano uziarnienie kruszywa w P2. W serii B1 dodatek korka nie zmienił wytrzymałości, ale zużył nieco więcej wody, a dodatek granulatu gumowego spowodował obniżenie wodożądności i wytrzymałości na ściskanie. Porównując B3.1 i B2.1, można stwierdzić, że perlit jest słabszym kruszywem aniżeli keramzyt, ale ilość wody i kruszywa głównego również miały znaczenie. Porównując wytrzymałości próbek P1 i P2, zauważono, że zwiększenie granulacji kruszywa lekkiego przyczyniło się do zwiększenia wytrzymałości betonu, więc zabieg ten może być korzystniejszy pod względami ekonomicznym i ekologicznym.

11.3. Podsumowanie i wnioski

Projekt Rewizji Dyrektywy o Efektywności Energetycznej Budynków (EPBD) Komisji Przemysłu, Badań Naukowych i Energii (ITRE) Parlamentu Europejskiego przewiduje, że od 2028 roku wszystkie nowe budynki w UE mają być zeroemisyjne, a budynki publiczne mają spełniać ten warunek już od 2026 roku [12]. Wynika stąd wniosek, że szukanie nowych rozwiązań materiałowych i ich charakteryzowanie przez badania jest konieczne. Betony lekkie bez wątplenia należą do materiałów przyszłości, więc badania nad nimi będą kontynuowane w kierunku zmniejszenia przewodności cieplnej, wodożądności oraz z użyciem kruszyw i wypełniaczy z materiałów odpadowych. Nie wyklucza się również zastosowania spoiwa innego niż cement, o niższym śladzie węglowym.

Bibliografia

1. Domagała L.: Konstrukcyjne lekkie betony kruszywowe, Monografia PK nr 462, Kraków 2014.
2. Dyrektywa Parlamentu Europejskiego i Rady 2018/844 z dnia 30 maja 2018 r. zmieniająca dyrektywę 2010/31/UE w sprawie charakterystyki energetycznej budynków i dyrektywę 2012/27/UE w sprawie efektywności energetycznej.
3. Dz.U. 2017 poz. 2285 Rozporządzenie Ministra Infrastruktury i Budownictwa z dnia 14 listopada 2017 r. zmieniające rozporządzenie w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać budynki i ich usytuowanie.
4. Dz.U. 2023 poz. 682 Obwieszczenie Marszałka Sejmu Rzeczypospolitej Polskiej z dnia 10 marca 2023 r. w sprawie ogłoszenia jednolitego tekstu ustawy – Prawo budowlane.
5. PN-EN ISO 10456:2009 Materiały i wyroby budowlane – Właściwości ciepłno-wilgotnościowe – Tabelaryczne wartości obliczeniowe i procedury określania deklarowanych i obliczeniowych wartości cieplnych.
6. PN-EN ISO 6946:2017-10 Komponenty budowlane i elementy budynku – Opór cieplny i współczynnik przenikania ciepła – Metody obliczania.
7. Firkowicz-Pogorzelska K.: Metodyka określania wartości obliczeniowej współczynnika przewodzenia ciepła materiałów budowlanych. Prace Instytutu Techniki Budowlanej, kwartalnik nr 3 (119) 2001, s. 33–53.
8. Kucypera S., Nadziakiewicz J.: Pomiary współczynnika przewodzenia ciepła i ciepła właściwego metodą stanu uporządkowanego. ZN Pol. Śl., Energetyka, z. 124, 1995, s. 143–156. http://delibra.bg.polsl.pl/Content/48798/BCPS-53206_1995_Pomiary-wspolczynnik.pdf.
9. Praca zbiorowa (red. Fodemski T.): Pomiary cieplne, cz. 1. Wydawnictwo WNT, Warszawa 2001.
10. Kostowski E.: Przepływ ciepła, Wydawnictwo PŚ, Gliwice 2006.
11. Parker W.J., Jenkins R.J., Butler C.P., Abbot G. L.: Flash method of determining thermal diffusivity, heat capacity and thermal conductivity “Journal Appl. Phys.” Vol. 32, 1961.
12. Serwis Samorządowy PAP. Projekt dyrektywy PE: Od 2028 roku wszystkie nowe budynki w UE mają być bez emisyjne. Dokument dostępny online od: 10.02.2023, dostęp: <https://samorzad.pap.pl/kategoria/srodowisko/projekt-dyrektywy-pe-od-2028-roku-wszystkie-nowe-budynki-w-ue-maja-byc>

12. ISOLATION AND POTENTIAL ASSESSMENT OF ENVIRONMENTAL BACTERIA FOR SELF-HEALING GEOPOLYMER USAGE – PRELIMINARY STUDIES

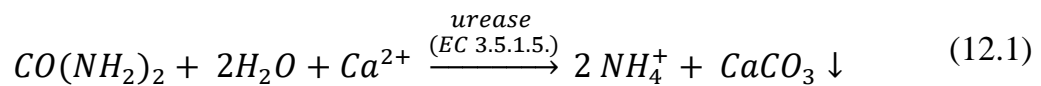
12.1. Introduction

Microorganisms are ubiquitous. Flexible adaptation mechanisms enabled them to colonize any type of environment. The consequence of this phenomenon is not only high diversity among the microorganisms themselves but also the richness of the processes they conduct, which man has learned to study and use. Today, microorganisms are indispensable in numerous technological processes. Environmentally friendly solutions, used in various fields, are the hallmark of today. The construction sector is also following this path and meeting the principles of sustainable development. One of the objectives of green building construction is to improve the materials used and to search for new, less environmentally harmful ones. One of the potentially useful materials could be a geopolymer. A geopolymer is an inorganic aluminosilicate polymer formed by polycondensation. This material is an amorphous, hard solid, similar to concrete or stone [1, 2, 3]. The most important properties of geopolymers include: significant thermal resistance (temperature up to 800°C), high compressive strength (25–100 MPa), high flexural strength (5–25 MPa), resistance to chemical agents (in particular acids, chlorides and sulphates), no or very slight contraction when bonding the material, very good adhesion to steel components and no corrosion of steel and low porosity [2].

For the synthesis of the geopolymer, 4 components are needed – reactive aluminosilicate (such as metakaolin, fly ash), activators such as sodium or potassium hydroxide and aqueous glass (aqueous solution of sodium or potassium silicate) and water. After mixing all substrates, a paste is formed, which hardens as a result of chemical reactions occurring between the components of the raw material [2]. Geopolymers are currently of great interest, mainly due to the fact that they are more environmentally friendly than classic building materials and fit into the concept of the circular economy.

It is estimated that 5–10% of human-related carbon dioxide emissions come from the cement industry. Replacing Portland cement with geopolymer binders makes it up to 4–8 times less CO₂ into the atmosphere. The reduction of environmental pollution is also linked to the possibility of using waste for the synthesis of geopolymers – in particular, fly ash and slags from the metallurgical, energy or mining industries. It is possible that in the future, geopolymeric materials may replace classic concrete made of Portland cement, or they will be an alternative solution for advanced construction applications [2, 3]. Like other building materials, geopolymers are gradually destroyed by environmental factors. In order to prevent the material from complete disintegration, it is worth looking at the modern modification possibilities of building materials, such as the addition of the ureolytic bacteria capable of synthesizing calcium carbonate.

The primary way in which microorganisms promote the precipitation of calcium carbonate is by metabolic processes that increase alkalinity [4]. The process of biomineralisation of calcium carbonate with the participation of ureolytic bacteria deserves special attention since the precipitation of sediment is carried out under ambient conditions. Microbially Induced Calcium Carbonate Precipitation (MICP), involving bacteria with active urease, has a number of chemical reactions which can be summarised as equation 12.1 [5]:



The biological precipitation of calcium carbonate with urease occurs due to the enzymatic hydrolysis of urea, leading to the formation of carbonate ions and hydroxide ions, which increase pH values. The walls of ureolytic bacteria serve as centers for calcium carbonate crystals' production. In their structure, they contain functional groups with a negative charge, which causes the binding of Ca²⁺ ions. As a result, CaCO₃ crystals grow on the outer surface of the cell wall of microorganisms [6].

The use of microbial precipitation technology for calcium carbonate has many advantages, such as: (1) reduction of carbon dioxide emissions into the atmosphere caused by the use of CO₂ for the synthesis of calcium carbonate, (2) reducing the maintenance and maintenance costs of buildings, roads and monuments, (3) reduction of environmental harm compared to the chemical methods used [7], (4) reducing the cost of bioremediation and bioconsolidation processes compared to the use of chemical methods due to the fact that microorganisms can carry out synthesis many times without the need to add additional portions of reactants [8].

Unfortunately, there is no perfect technology, and in the case of MICP, the disadvantages are: (1) production of ammonium ions and ammonia during the decomposition process of urea, which at high concentrations may be toxic to humans and the environment, (2) kinetics and complexity of biological processes – biological reactions tend to be slower and more complex than chemical reactions, (3) dependence of process speed on many environmental factors – microbial activity depends on pH, temperature, humidity, concentration and diffusion rate of nutrients and metabolites [9].

There are many species of environmental microorganisms capable of precipitating calcium carbonate. However, in the case of building materials, very high pH should be taken into consideration while searching for microorganisms useful in such applications. Therefore, the environmental material for screening ureolytic bacteria useful in such materials usage should be performed with the samples with a comparably high pH. Thus, the aim of this research was the environmental screening for alkaliphilic ureolytic bacteria able to precipitate calcium carbonate, followed by their characterization and testing their potential use as a component for self-healing geopolymer production.

12.2. Materials and methods

12.2.1. Samples preparation and bacterial counting

The isolation of microorganisms potentially capable of precipitation of calcium carbonate was carried out from three different building materials: plaster mortar (environmental sample), concrete and geopolymer (samples obtained from the Faculty of Civil Engineering of the Silesian University of Technology, Poland). The material was crushed, and serial dilutions were made in sterile saline. The pH of the materials used in the obtained solution was measured with a pH meter (Elmetron). The dilution series prepared in this procedure were subjected to a pasteurization process by placing the samples for 20 minutes in a water bath set at 70°C to isolate spore-forming bacteria. Spore-forming bacteria counting was performed by broth agar (total bacteria number; BTL, Łódź, Poland) and urea agar (urea-degrading bacteria number; containing 20 g/L of urea [10]) media. Each dilution was inoculated in three repetitions. Plates with broth medium were incubated for 72 h and with urea medium for 5 days at 30°C.

12.2.2. The isolation of pure bacterial cultures capable of precipitation of calcium carbonate

After the incubation period, colonies differed in their morphology and presenting mat surface was selected from urea and re-inoculated on urea medium. The plates inoculated with single-colony material were incubated at 30°C for 5 days for identification tests and the next 7 days to observe calcium carbonate precipitation by observing every 24 hours the surface of the growing colonies under the Delta Optical SZ-430T stereoscopic microscope at 40-fold magnification (40×).

In this study, the reference strain was spore-forming calcium carbonate producer - *Bacillus sphaericus* (no. PCM 485, Polish Collection of Microorganisms of the Institute of Immunology and Experimental Therapy of the Polish Academy of Sciences in Wrocław, Poland).

12.2.3. Bacterial isolates characteristics

The isolated strains were characterized morphologically with the colony morphology on urea medium, Gram staining and Schaeffer-Fulton spore staining in the Wirtz modification. Biochemical characterization and identification of elongated forms were carried out using API 50 CH tests (BioMérieux), dedicated to the identification of *Bacillus* and related genera and representatives of *Enterobacteriaceae* and *Vibrionaceae*. For strain 2 (spherical form), the API 20 Strep test (BioMérieux) was used to identify *Streptococcaceae* and related microbes. The tests were carried out according to the manufacturer's instructions. In addition, the obtained isolates were tested using the plating method for amylolytic activity on solid media with starch, lipolytic on fat and proteolytic with gelatine.

Commercial dry and wet urease tests to detect *Helicobacter pylori*, produced by the Institute of Food and Nutrition in Warsaw, Poland, were used to study the ability of strains to decompose urea. The tests make possible to detect bacteria capable of producing large amounts of urease, which is manifested as a change in the color of the test field.

Genetic identification was carried out on the basis of DNA isolated from the tested strains cultured on the LB liquid medium (BTL, Łódź). The isolation of bacterial genetic material was carried out using the Genomic Mini DNA Isolation Kit (A&A Biotechnology) according to the manufacturer's instructions. On the isolated DNA, PCR amplification of the fragment of the 16S rRNA coding gene was performed using

the primers 27f (5'-AGAGTTTGATCMTGGCTCAG-3') and 1492 r (5'-TACGGYTACCTTTTACGACTT-3') according to the methodology described earlier [11]. PCR products were purified after the PCR reaction using the Clean-Up Kit (A&A Biotechnology) and sequenced using the ABI Prism sequencer using the ABI Prism BigDye Terminator Cycle Sequencing kit (Applied Biosystems) according to the manufacturer's instruction. The sequences were read in Chromas, and the identification was made using the Basic Local Alignment Search Tool (BLASTn) based on the GenBank National Center for Biotechnology Information (NCBI).

12.2.4. Testing the selected strains in construction applications

For the reference strain (*Bacillus sphaericus*) and strains 1 and 8 showing the highest ureolytic activity, liquid broth cultures (BTL, Łódź, Poland) with the addition of urea (1 g/L) were prepared. After a week's incubation, liquid cultures were centrifuged for 10 minutes at 4400 rpm, and the sediment was suspended in 5 ml of sterile saline. Using the dilution and plating methods, the number of bacteria in the resulting suspension was determined as CFU/mL.

12.2.5. Synthesis of geopolymer samples

Thirty-two rectangular geopolymer forms were prepared – 8 with dimensions of 30×30×250 mm and 24 with dimensions of 40×40×160 mm. Each mixture contained precursor (metakaolin) and activators (sodium silicate and sodium hydroxide). Metakaolin (MK-40) was supplied by Astra Technologia Betonu in the form of ready-to-use powder. The chemical composition of metakaolin is given in Table 12.1. Sodium silicate has been delivered by Z.Ch. Rudniki S.A. in the form of a ready-to-use water solution, type 145. The manufacturer specifies the following characteristics of the material: ratio of SiO₂ to Na₂O in the range 2.4 and 2.6, the minimum content of oxides (SiO₂ and Na₂O) 39%, density at 20°C between 1.45 and 1.48 g/m³. The water solution of sodium hydroxide (concentration 10 M/L) has been prepared minimum 24 hours before the preparation of samples by dissolving sodium hydroxide pellets in deionised water. Additives – calcium hydroxide (POCH), urea (Sigma Aldrich) and bacterial strains were added to the chosen mixtures.

The synthesis included 8 different geopolymer samples: (1) sample 1 – abiotic control (classic geopolymer), (2) sample 8 – abiotic control in which part of the

metakaolin has been replaced by urea and $\text{Ca}(\text{OH})_2$, (3) samples K1, K2 and K3 – biotic controls (classical geopolymer + strain 1 for K1; strain 8 for K2; reference strain *B. sphaericus* for K3), (4) P1, P2 and P3 samples – specific samples (geopolymer in which part of the metakaolin has been replaced by urea and $\text{Ca}(\text{OH})_2$ + strain 1 for P1, strain 8 for P2 and reference strain *B. sphaericus* for P3).

Table 12.1

Oxide composition of metakaolin¹ [%]

SiO ₂	Al ₂ O ₃	K ₂ O	TiO ₂	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	H ₂ O	Na ₂ O	P ₂ O ₅	Cl	S
53.12	42.24	0.73	0.64	0.45	0.44	0.26	0.22	0.09	0.03	0.02	0.01

¹Data supplied by producer – Astra Technologia Betonu®

Subsequently, mixtures for the synthesis of geopolymers were prepared, according to Table 12.2, and a comparison of the compositions of geopolymer beams is shown in Figure 12.1.

Table 12.2

Geopolymer mixtures' composition

mixtures	unit	metakaolin	sodium silicate	NaOH	Ca(OH) ₂	urea	bacterial suspension
1 (abiotic control)	[kg/m ³]	1296.9	556.4	272.0	0	0	0
8 (abiotic control)	[kg/m ³]	852.5	556.4	272.0	222.2	222.2	0
K1, K2, K3 (biotic control)	[kg/m ³]	1296.9	552.5	268.1	0	0	7.8
P1, P2, P3 (samples)	[kg/m ³]	852.5	552.5	268.1	222.2	222.2	7.8

The walls of the molds are covered with a thin layer of petroleum jelly aerosol. Activators, i.e. water glass together with a 10 M sodium hydroxide solution, were poured into one beaker, stirred on a magnetic stirrer for 5 minutes, then transferred to the remaining ingredients and grated until uniform consistency. The resulting paste was poured into the prepared forms, avoiding the formation of air bubbles, and then tightly secured with a polyethylene film. The samples were incubated in the dark, at room temperature (~20°C), for 7 days.

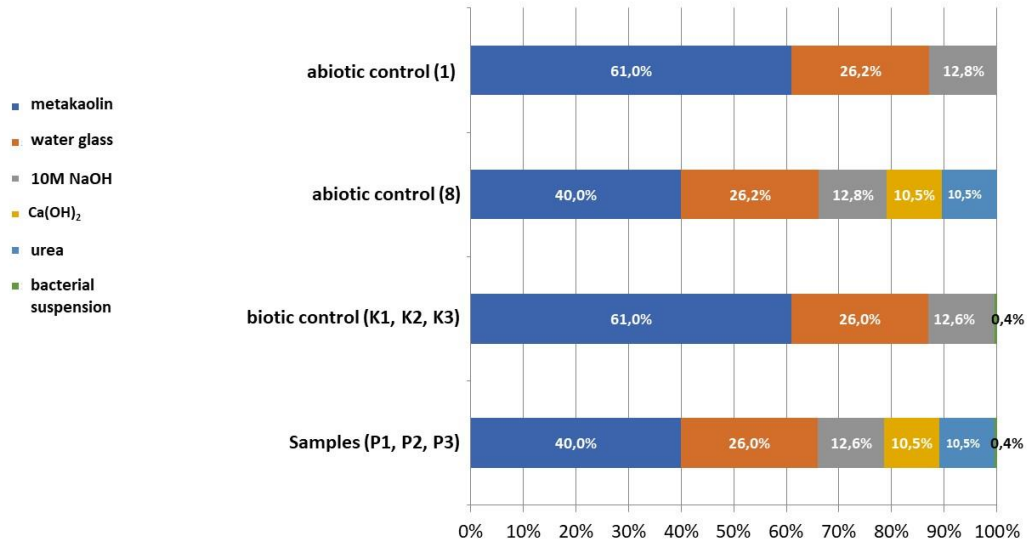


Fig. 12.1. Comparison of the composition of mixtures used for the synthesis of geopolymer samples
 Rys. 12.1. Porównanie składu mieszanin użytych do syntezy próbek geopolimerów

12.2.6. Strength and microscopic testing of geopolymer samples

After a week of maturation, all the samples were deformed. Three prismatic samples of dimensions 40×40×160 mm were prepared from each mixture. Each sample was subjected to a flexural strength test, and then halves of broken beams were subjected to the compressive strength test. Three samples of each mixture were subjected to the flexural strength test. Then, five samples of each mixtures were subjected to the compressive strength test (one half-prism from each series was left for further maturation so that after 21 days, another measurement could be carried out). One half was used for compression strength tests, and the other was left for further maturation so that after 21 days, another measurement could be carried out. Strength tests were carried out in accordance with PN-EN 196-1:2016 using the CONTROLS PILOT 65-L27C12 device.

Beams measuring 30×30×250 mm were used for microscopic examinations. Sterile plastic containers were used to incubate the samples. Each sample was gently scratched, and put on a plastic cap with distilled water in such a way that the scratch was in contact with water and air at all times. The samples prepared in this way were incubated in the dark, at room temperature, for 18 days. Every few days, the beams were dried and viewed under a Delta Optical SZ-430T stereoscopic microscope (40×), and microscopic image images were taken.

12.2.7. Determination of the presence of bacteria in the geopolymer

Two weeks after the samples were de-molded and incubated in distilled water, small fragments of P1, P2, P3, K1, K2 and K3 samples and a crystallized substance were taken from the P1, P2 and P3 sample lids and suspended in 1ml of sterile saline. The suspensions prepared in this way were shaken for 30 minutes at 30°C at 1000 rpm and then plated on a broth solid medium. Each sample was inoculated in triplicate. The plates were incubated for 24 h at 30°C. To observe the crystallization of urea, its solution was poured into a dish and incubated under the same conditions as geopolymer samples. After 4 days, the dish was checked, and a photo was taken.

12.3. Results and discussion

Three different building materials were selected as a potential sources of microorganisms – plaster mortar, concrete and geopolymer. The selection of such samples increases the likelihood of isolating bacteria that will be able to survive in a highly alkaline environment of building materials (pH at level 8.5 for the mortar to 12 for concrete and geopolymer, as measured).

For the aim of this study, alkalophilic spore-forming microorganisms were required. the plating method enabled to estimate the total abundance of spore-forming bacteria on the solid broth medium and on urea plates (Fig. 12.2).

Macro- and microscopic morphological identification was performed for eight isolated bacterial strains obtained for this study. All the tested strains were Gram-positive spore-forming, and all but one, spherical cells of strain 2, were bacilli-shaped. All bacterial strains used in this experiment were urea degrading, which was analyzed on solid medium growth containing urea, and the colonies had matt surfaces, which could indicate the formation of a calcium carbonate deposit [6].

Biochemical identification was carried out for all isolated bacterial strains and the reference strain using starch, fat and gelatine substrates, rapid urease tests and dedicated API tests. The results obtained for biochemical characteristics and probable identification are collected in Table 12.3. None of the tested strains showed amyolytic activity. Lipolytic activity was not shown only by strain 8 and the reference strain. Only strain 2 did not demonstrate the ability to use gelatine as a nutrient substrate.

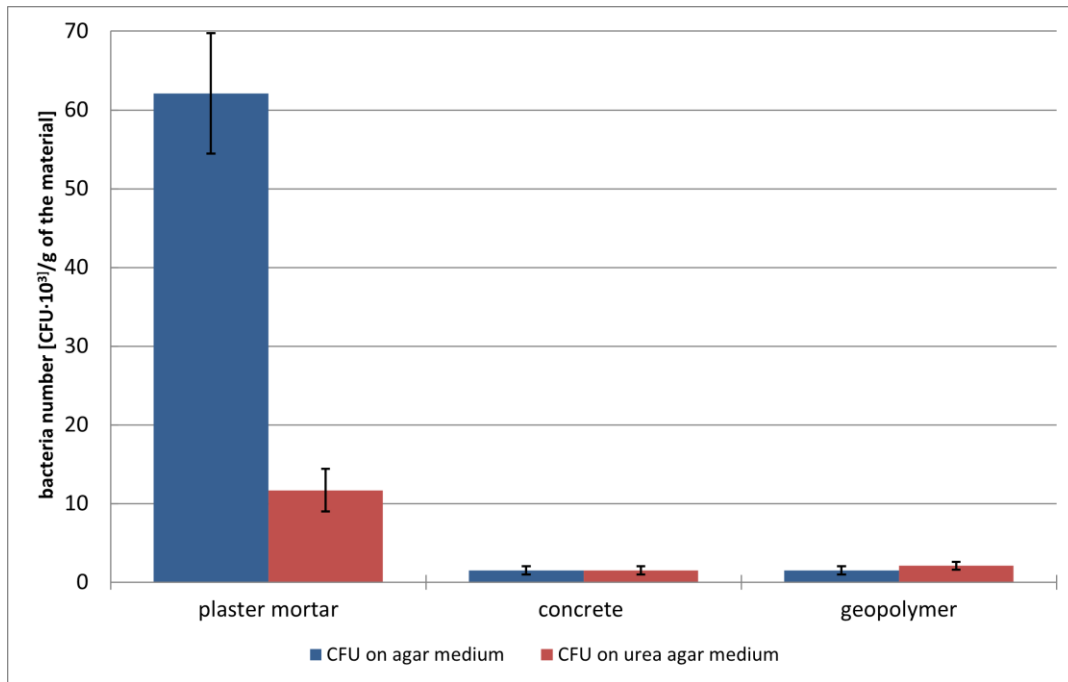


Fig. 12.2. The number of sporulating bacteria growing on agar and urea agar for plaster mortar, concrete and geopolymer samples; standard deviation is marked

Rys. 12.2. Liczba bakterii sporulujących, rosnących na podłożu bulionowym stałym i podłożu z mocznikiem, pochodzących z próbek zaprawy tynkowej, betonu i geopolimeru; zaznaczono odchylenie standardowe

Commercial rapid urease tests were used to check whether isolated strains produce urease with *Proteus vulgaris* as a control strain. A change in the test color in wet and dry tests was observed only for strains 1 and 8. Therefore, these strains have an active urease that efficiently converts urea to ammonia and carbon dioxide. The results of rapid urease tests for the remaining strains do not indicate that they produce urease. However, it is important to remember this urease test's purpose for a specific, pathogenic bacterial strain, such as *Helicobacter pylori*.

Based on the results of morphological identification, appropriate API tests for biochemical research were selected. Strains 1 and 3–7 were identified as *Bacillus pumilus* with a probability of correct identification of 99.9%. Such a high probability should guarantee the correctness of the identification. According to literature data, strains of the *Bacillus pumilus* species produce proteases, some also gelatinase (responsible for the breakdown of gelatine) and lipase. They are incapable of decomposing starch and urea [12, 13]. All these strains did not show the ability to decompose starch but showed lipolytic and proteolytic activity, which agrees with the literature mentioned above. The remaining strains can be considered correctly identified, although phenotypic differences in biochemical profiles are noticeable, both in the amount and the rate of fermentation of substrates in test tubes.

Table 12.3

Biochemical characteristics of test bacterial strains and their possible identification based API tests (BioMérieux).

BIOCHEMICAL CHARACTERISTICS OF BACTERIAL STRAINS						
strain	ABILITY TO DECOMPOSE STARCH	ABILITY TO BREAK DOWN FATS	ABILITY TO BREAK DOWN GELATIN	QUICK UREASE TEST DRY	RAPID WET UREASE TEST	API test based identification (% of probability)
	"+" shows "-" does not show	"+" shows "-" does not show	"+" shows "-" does not show	"+" color change "-" no change	"+" color change "-" no change	
strain 1	-	+	+	+	+	<i>Bacillus pumilus</i> (94.9%)
strain 2	-	+	-	-	-	<i>Aerococcus viridans</i> (99.1%)
strain 3	-	+	+	-	-	<i>Bacillus pumilus</i> (94.9%)
strain 4	-	+	+	-	-	<i>Bacillus pumilus</i> (94.9%)
strain 5	-	+	+	-	-	<i>Bacillus pumilus</i> (94.9%)
strain 6	-	+	+	-	-	<i>Bacillus pumilus</i> (94.9%)
strain 7	-	+	+	-	-	<i>Bacillus pumilus</i> (94.9%)
strain 8	+/- (uncertain discoloration of the substrate)	-	+	+	+	<i>Bacillus cereus</i> (94.9%)
reference strain <i>Bacillus sphaericus</i>	-	-	+/- (uncertain discoloration of the substrate)	-	-	-

The biochemical profiles of strain 8 and the reference strain differ significantly from each other and from other isolates. Strain 8 was identified as *Bacillus cereus* with a probability of correct identification of 94.9%. Literature data confirm that strains of the *Bacillus cereus* species have proteolytic properties, including gelatine breakdown [13]. They should also carry out hydrolysis of fats and starch [14], which has not been confirmed for this strain. Some strains can also produce urease (Mols and Abee, 2008). Based on the data collected, it can be concluded that strain 8 was most likely correctly identified as *Bacillus cereus*. This identification was confirmed with 16S rRNA coding gene sequencing.

Strain 2 identified *Aerococcus viridans* with a probability of 99.1%. There are reports that species designation systems based on biochemical reactions are not specific to *Aerococcus* sp., so identification based only on the biochemical profile may not be accurate [16]. These microorganisms belong to aerobic, gram-positive cocci that do not produce spores. On blood agar, they grow in the form of small, transparent colonies [17]. *Aerococcus viridans* is classified as a thermophilic bacterium [18]. Isolated strain 2 survived pasteurization, which may be due to its resistance to high temperature. However, it would be suspected that the spore staining case of this strain gave a false-positive result. The microscopic image is blurred, and it is possible that the visible turquoise structures are an unrinsed dye – malachite green. *Aerococcus viridans* bacteria are isolated from the urine of patients with urinary tract infections [16]. Strains of this species can grow in an alkaline environment (pH 6-9) but do not hydrolyze starch, gelatine and urea [19]. They are capable of producing lipases [20]. Despite the lack of production of urease, they grow in the urea environment, which was also noted for the isolated strain. Strain 2 did not show activity on starch and gelatine, it only carried out hydrolysis of fats, which is consistent with literature data. On the basis of the tests carried out, it can be concluded that there is a probability that the isolated strain is representative of the *Aerococcus viridans* species.

Based on the test performed for the reference strain, it can be seen that API tests do not always give a 100% correct identification result. This is due to the fact that bacterial strains, in particular environmental isolates, are characterized by very high biochemical plasticity. This means that representatives of one species can be very different in terms of metabolic properties, however, being taxonomically assigned to one species.

In addition, since strains 1 and 8 were used for further research, these two isolates were genetically identified. Strain 1 was identified with this method as *Arthrobacter crystallopoietes*. Bacteria of the genus *Arthrobacter* are commonly found in the

environment, particularly in the soil [21]. They grow in the form of large white-grey colonies [22]. They are classified as gram-positive bacteria with an elongated shape, but they do not produce spores [21]. Species of this genus can produce urease. Some of them can also break down fats, proteins and starch [23]. Based on the results of spore staining obtained for strain 1 and the fact that the sequencing results did not give a clear answer as to species affiliation, it can be assumed with a high probability that the isolate does not belong to the species *Arthrobacter crystallopoietes*. Strain 8 was probably properly identified as *Bacillus cereus*.

It can be seen that after 2 days of incubation for all strains, a precipitated substance is visible on their surface (Fig. 12.3). The largest crystals for strain 1 appear after 5 days of incubation. During subsequent observations, no increase in the size of the substance crystals was noticed. Comparing the images for strain 8, the difference between the crystals produced after 5 days and the after 9 days of incubation can be observed, which indicates that during this time, the most effective crystal growth occurred (Fig. 12.3).

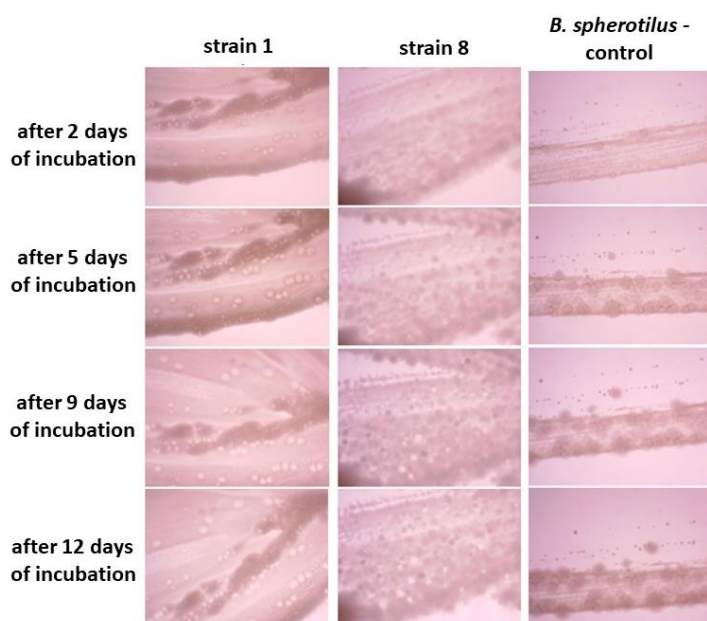


Fig. 12.3. Observations of crystal growth (probably calcium carbonate) on urea medium for strains 1, 8 and standard (40× magnification)

Rys. 12.3. Obserwacje wzrostu kryształów (prawdopodobnie węglanu wapnia) na podłożu z mocznikiem dla szczepów 1, 8 i kontroli (powiększenie 40×)

It can therefore be concluded that each strain precipitates a crystalline substance at different rates, which may be related to the production of different varieties of urease – isoforms of the enzyme or isoenzymes. Enzyme isoforms are formed as a result of post-translational modifications of proteins, while isoenzymes are the result of

polymorphism of genes encoding urease. Enzymes that catalyze the same reaction but come from different organisms often show different enzymatic activity and may have different kinetic properties, which may have affected the results. Strains 1 and 8 could use the urea contained in the medium relatively fast (as indicated by the urease tests carried out), which could result in a slight increase in crystals over time.

As it was stated that strains 1, 8 and control produce crystal substance on solid medium and gave positive results in the urease test, they were used to prepare geopolymer samples, which after a week of maturation were disbanded, tested mechanically in strength tests and were scratched to check the ability of cracks to self-heal (Fig. 12.4). The outlined material was moistened and incubated while the changes in the material were observed regularly.

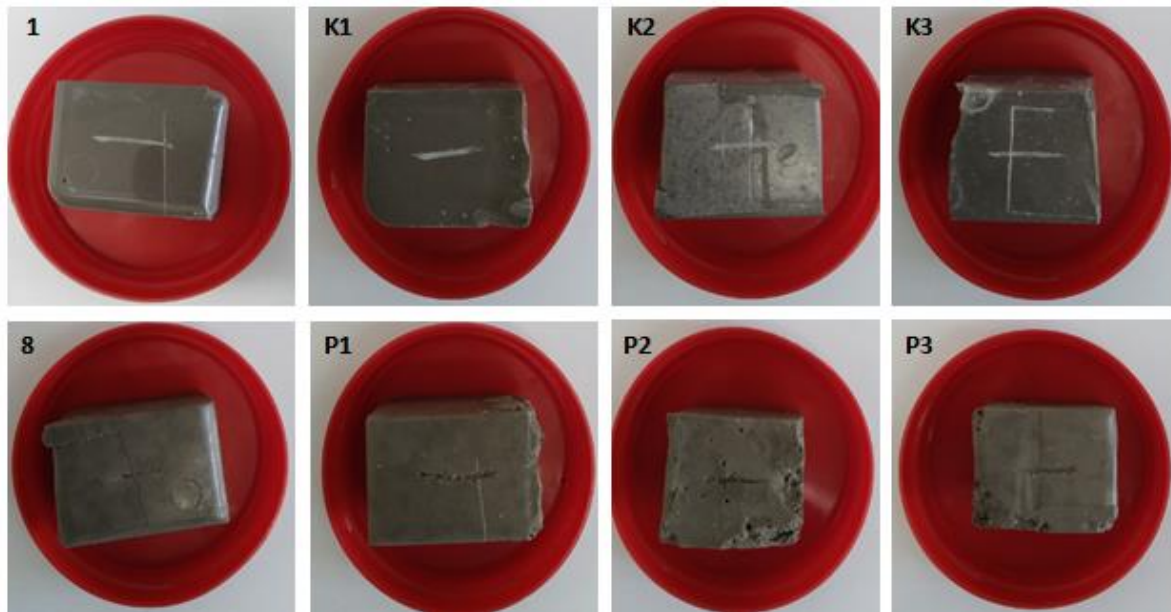


Fig. 12.4. Geopolymer beams measuring 30×30×25 mm when scratched: 1 – abiotic control, 8 – abiotic control with the addition of urea and Ca(OH)₂, K1 – biotic control with strain 1, K2 – biotic control with strain 8, K3 – biotic control with standard strain, P1 – specific sample with strain 1, P2 – specific sample with strain 8, P3 – specific sample with standard strain

Rys. 12.4. Belecзки geopolimerowe o wielkości 30×30×25 mm po zarysowaniu; 1 – kontrola abiotyczna, 8 – kontrola abiotyczna z dodatkiem mocznika i Ca(OH)₂, K1 – kontrola biotyczna ze szczepem 1, K2 – kontrola biotyczna ze szczepem 8, K3 – kontrola biotyczna ze szczepem kontrolnym, P1 – próbka właściwa ze szczepem 1, P2 – próbka właściwa ze szczepem 8, P3 – próbka właściwa ze szczepem kontrolnym

Analyzing Figure 12.4, it can be seen that the scratch for samples 1, K1, K2 and K3 has a white color, and for 8, P1, P2 and P3, it has taken on the color of beams. Moreover, much greater force had to be used to scratch samples 1, K1, K2 and K3 than in the case of other samples, which was most likely due to the less porous structure of these beams.

Each sample from each mixture was measured and weighed before the strength test. Density was calculated by dividing the mass of each sample by its volume. Samples containing urea and calcium oxide (8, P1, P2, P3) had much lower density (1680, 1680, 1690, 1690 kg/m³, respectively) than the other samples (1, K1, K2, and K3 density was 1890, 1870, 1860 and 1880 kg/m³, respectively). It is worth emphasizing that the total mass of added ingredients to the mixtures was always the same, also, the observed changes are the result of the properties of additionally used substrates. The lower density is probably caused by a significantly greater amount of air present inside the geopolymer containing urea and calcium oxide. The type of bacterial strain had no significant influence on the density of hardened material.

The composition of samples 1, K1, K2 and K3 is significantly different from that of samples 8, P1, P2 and P3 (Fig. 12.1). For samples 8, P1, P2 and P3, the amount of added metakaolin – the main substrate for geopolymer synthesis – was reduced – 21% of its mass was replaced by calcium hydroxide and urea in a ratio of 1:1. Such a drastic change in the composition of the geopolymer mixture affected the beams' appearance after demolding and influenced their density. Urea and calcium hydroxide were added in a loose form without dissolving. After all the components were mixed, geopolymer synthesis began, during which urea could undergo alkaline hydrolysis, reacting with a solution of sodium hydroxide or calcium hydroxide. The ammonia released in the process caused the unpleasant smell of the samples. In addition, sodium hydroxide acts as an activator in the process of geopolymer formation, activating aluminosilicates in metakaolin [2]. Its reduced amount, resulting from the reaction with urea, could also negatively affect the process of geopolymer synthesis by not activating all possible groups in metakaolin.

A reduced amount of metakaolin means fewer reactive aluminosilicates in the sample, which means that fewer bonds and a less extensive network can be formed than in a traditional geopolymer. Most likely, this affects the density and strength of the samples. Already during the demolding of the beams, it was possible to estimate that the samples from the second group (8, P1, P2 and P3) would have much lower strength than the beams from the first group (1, K1, K2 and K3).

The smaller mass of samples from the second group is most likely due to the presence of urea in the form of granules – it occupied a certain volume in the sample, and during maturation, it was leached or hydrolyzed, as a result of which empty pores of a much lower mass were formed. Figure 12.5 shows the cross-section of geopolymer samples with and without bacteria addition.

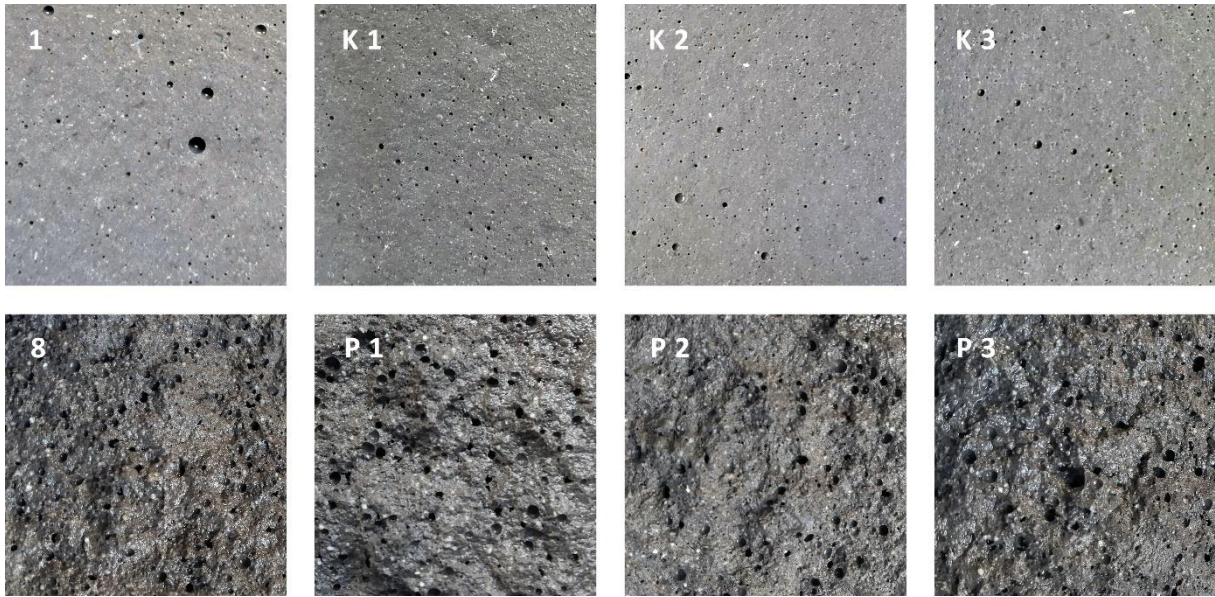


Fig. 12.5. Geopolymer beams in cross-section after flexural strength tests: 1 – abiotic control, 8 – abiotic control with the addition of urea and $\text{Ca}(\text{OH})_2$, K1 – biotic control with strain 1, K2 – biotic control with strain 8, K3 – biotic control with standard strain, P1 – specific sample with strain 1, P2 – specific sample with strain 8, P3 – specific sample with standard strain

Fig. 12.5. Belecзки geopolimerowe w przekroju poprzecznym po badaniach wytrzymałościowych na zginanie: 1 – kontrola abiotyczna, 8 kontrola abiotyczna z mocznikiem i $\text{Ca}(\text{OH})_2$, K1 – kontrola biotyczna ze szczepem 1, K2 – kontrola biotyczna ze szczepem 8, K3 – kontrola biotyczna ze szczepem kontrolnym, P1 – próbka właściwa ze szczepem 1, P2 – próbka właściwa ze szczepem 8, P3 – próbka właściwa ze szczepem kontrolnym

In the cross-section, beams 1, K1, K2 and K3 looked like a standard geopolymer sample – a smooth, dry and homogeneous structure with few pores, which are the result of the lack of use of a vibratory table, used to thicken the mixtures poured into forms, by eliminating air bubbles. Beams 8, P1, P2 and P3 have differed heavily. Their surface was wet and crumbly, and numerous pores were visible. Most likely, they arose as a result of leaching or alkaline hydrolysis of urea. Urea was added in the form of small granules to the mixture, and it was not completely dissolved during mixing. During the synthesis process, urea could retain its spherical form, and only during the maturation of geopolymers could urea dissolve and leach, and consequently, large air spaces could form in these places. Another possibility was the alkaline hydrolysis of urea. The by-product of the polycondensation process is NaOH , which after the geopolymer synthesis process, could react with urea, as a result of which ammonia and soluble carbonates were released. Ammonia is a gas that is converted to the ammonium ion (NH_4^+) in the aqueous environment. It could cause a characteristic smell of samples, and in the effect carbonates, as a result of capillary forces, could be washed to the surface of the samples [24] or become trapped in the pores, which would explain the wet surface of the samples in the cross-section. After the carbonates were

dissolved and the ammonium ions were released, pores would also form in these places. It is worth emphasizing that it was already visually possible to see the differences in the densities of the samples.

The obtained samples of geopolymer were analyzed mechanically. Just after demolding, samples from series 1, K1, K2 and K3 had plain, smooth and shiny surfaces (Fig. 12.6b), while samples from series 8, P1, P2 and P3 had patterns of slightly darker spots on its surface (Fig. 12.6a). A few minutes after demolding, the surface of samples containing urea and calcium oxide (8, P1, P2, P3) started covering with a pattern of shallow cracks, as it is visible in Figure 12.7. After 28 days of curing (21 days after demolding) surface of these samples was covered with the white crystals (Fig. 12.8). In contrast, surface of control samples, containing only metakaolin and bacteria (1, K1, K2, K3), remained plain and smooth without any sign of white crystals. The amount of white crystals on samples from series 8, P1, P2 and P3 increased significantly during the next two weeks on the lab shelf, what is shown in Figure 12.9 (48 days of curing, 41 days after demolding).

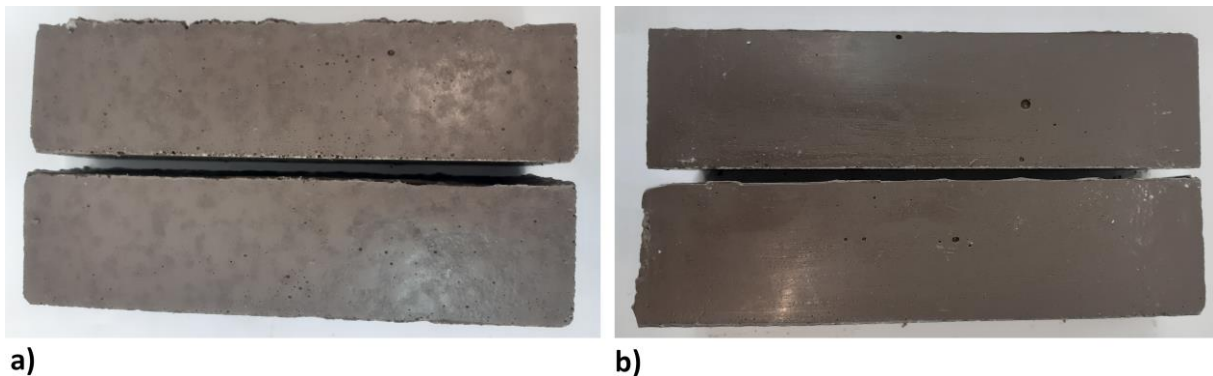


Fig.12.6. External appearance of samples just after demolding (after 7 days of curing in moulds). Samples from series: a) 8, b) 1

Rys. 12.6. Wygląd zewnętrzny próbek po rozformowaniu (po 7 dniach utwardzania w formach). Próbki z serii: a) 8, b) 1



Fig. 12.7. Cracks on the surface of sample from series 8, few minutes after demolding

Rys. 12.7. Pęknięcia na powierzchni próbek z serii 8, kilka minut po rozformowaniu

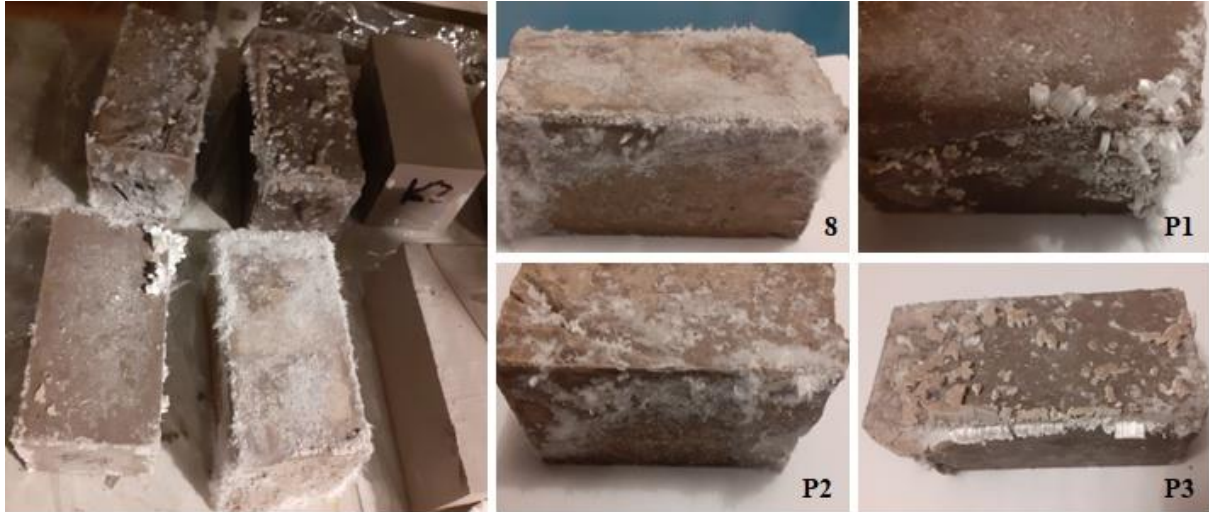


Fig. 12.8. Appearance of geopolymer beams after 28 days of maturation: 8 – abiotic control with the addition of urea and $\text{Ca}(\text{OH})_2$, P1 – specific sample with strain 1, P2 – specific sample with strain 8, P3 – specific sample with standard strain

Rys. 12.8. Wygląd beleczek geopolimerowych po 28 dniach dojrzewania: 8 – kontrola abiotyczna z dodatkiem mocznika i $\text{Ca}(\text{OH})_2$, P1 – próbka właściwa ze szczepem 1, P2 – próbka właściwa ze szczepem 8, P3 – próbka właściwa ze szczepem kontrolnym

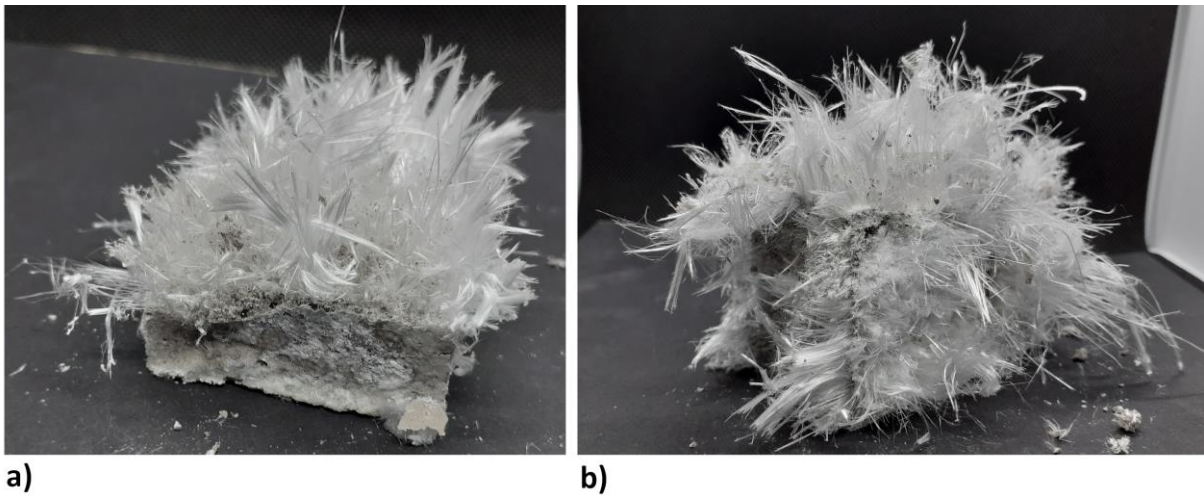


Fig. 12.9. External appearance of samples containing urea and $\text{Ca}(\text{OH})_2$ after 48 days of curing (41 days without a mould)

Rys. 12.9. Wygląd zewnętrzny próbek zawierających mocznik i $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 48 dni od utwardzenia (41 dni bez formy)

The results of the compressive and flexural strength of geopolymers are shown in Figure 12.10. Each bar, as well as the value given above the bar, represents the average result obtained within each series. The black segment in the upper part of the bar represents respectively the highest and the lowest result achieved within each series. Table 12.4 contains standard deviations and coefficients of variation of all flexural and compressive strength results.

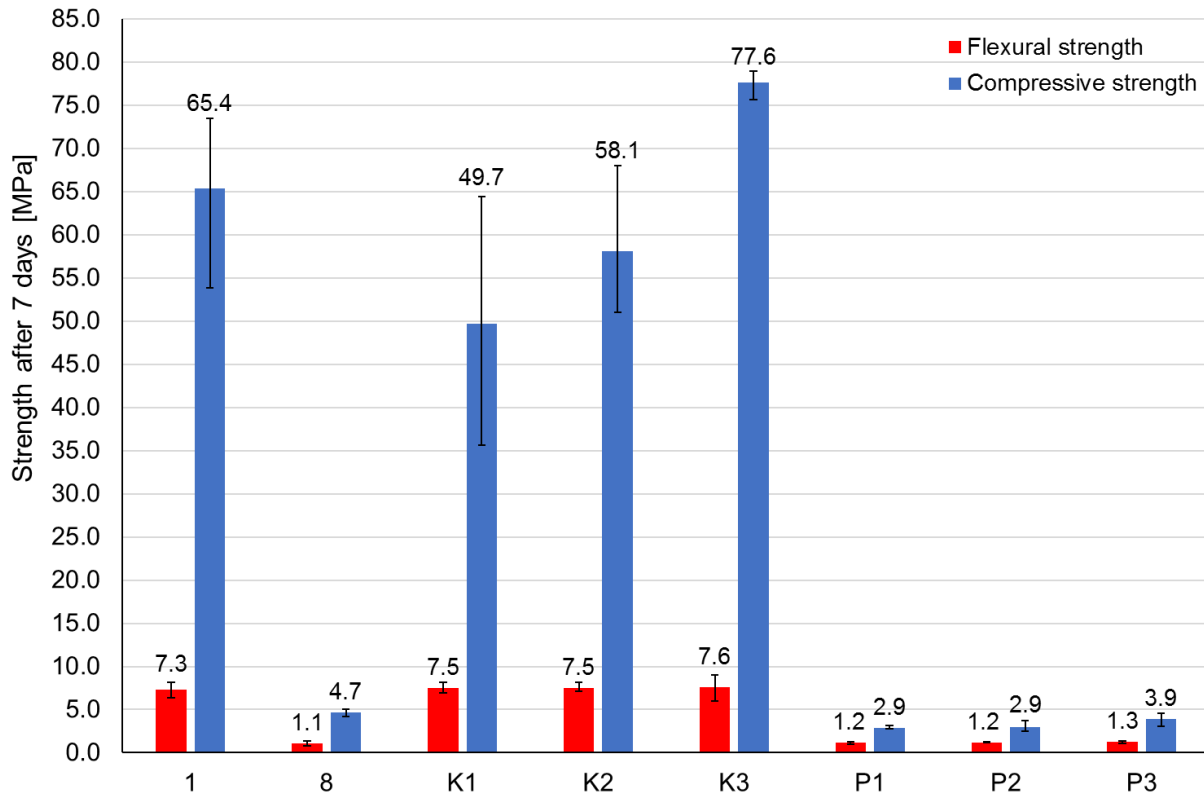


Fig. 12.10. Compressive and flexural strength results for test samples: 1 – abiotic control, 8 – abiotic control with urea and $\text{Ca}(\text{OH})_2$, K1 – biotic control with strain 1, K2 – biotic control with strain 8, K3 – biotic control with standard strain, P1 – specific sample with strain 1, P2 – specific sample with strain 8, P3 – specific sample with standard strain

Rys. 12.10. Wyniki testów wytrzymałościowych na ściskanie i zginanie dla próbek: 1 – kontroli abiotycznej, 8 – kontroli abiotycznej z mocznikiem i $\text{Ca}(\text{OH})_2$, K1 – kontroli biotycznej ze szczepem 1, K2 – kontroli biotycznej ze szczepem 8, K3 – kontroli biotycznej ze szczepem kontrolnym, P1 – próbki właściwej ze szczepem 1, P2 – próbki właściwej ze szczepem 8, P3 – próbki właściwej ze szczepem kontrolnym

Table 12.4

Standard deviation and coefficient of variation of flexural and compressive strength results

sample \ test		1	8	K1	K2	K3	P1	P2	P3
flexural strength	St. dev. [-] (Co V [%])	0.93 (12.8)	0.33 (29.2)	0.62 (8.2)	0.58 (7.7)	1.52 (20.1)	0.14 (11.7)	0.05 (4.2)	0.15 (11.9)
compressive strength	St. dev. [-] (Co V [%])	8.4 (12.9)	0.36 (7.6)	12.91 (26.0)	7.13 (12.3)	1.57 (2.0)	0.19 (6.6)	0.52 (17.7)	0.55 (14.1)

According to Figure 12.10, the type of bacterial strain does not influence the flexural strength of the geopolymer. The differences in average flexural strength of samples K1, K2 and K3 were negligible. The same situation was noticed in the case of the flexural strength of samples P1, P2 and P3. Samples from series 1 had almost the same flexural strength as samples from series K1, K2, and K3. The same similarity was observed between samples from series 8 and P1, P2, P3. Samples from series K1, K2, and K3 achieved over 5 times higher flexural strength than samples from series P1, P2, and P3. The compressive strength of samples 1, K1, K2, and K3 was also considerably higher than the compressive strength of samples 8, P1, P2, and P3. This situation may lead to the conclusion that flexural and compressive strength was adversely affected by the presence of urea and calcium hydroxide, while the presence of bacteria has less significant effect on mechanical behavior. According to the results, oppositely to the flexural strength, compressive strength was dependent on the type of bacterial strain. The compressive strength of samples K2 was 17% higher than the compressive strength of samples K1. The compressive strength of samples K3 was, in turn, 34% higher than samples K2. The compressive strength of samples P1 and P2 were equal, while samples P3 achieved 34% higher compressive strength. Samples from the control geopolymer mixture 1 achieved higher compressive strength than samples with biotic control K1 and K2 but lower than samples K3. Generally, samples from series K3 (biotic control with the reference bacterial strain) obtained the highest flexural and compressive strength. That result may lead to the conclusion that the addition of a bacterial strain can enhance the mechanical behavior of metakaolin-based geopolymer. The presence of urea and calcium hydroxide, in turn, considerably lowers both flexural and compressive strength. No strict correlation between the stability of results (coefficient of variation presented in Table 12.4) and the composition of the mixture was observed.

All samples between the 11th and 18th day were incubated without water in order to check their ability to self-seal cracks (data not shown). In all cases, there were no visible changes in the cracks structure. It is probable that the scratches made on the studied geopolymer beams may have been too wide. According to the literature, the maximum width of healed cracks with the participation of bacteria is 970 μm [25]. Measurements of scratches should be carried out to be able to determine whether the sealing of such a hole by bacteria has a chance to occur. Moreover, there is a possibility that because bacteria were added to geopolymer with no protection (such as gel coating), the geopolymer environment was too damaging for their cells to produce self-healing precipitates.

In order to determine the presence of bacteria in the matured geopolymer, suspensions in saline of small fragments of all samples were prepared and inoculated on agar plates. Only single colonies for samples P2 and P3 were obtained, which could be microbial contamination. These results support the thesis that bacterial suspension for self-healing geopolymer's cracks should be protected against harmful geopolymer conditions. Moreover, it should also be suspected that the biological material in the geopolymer is not evenly distributed, so these results could be false negative. Thus both cells' protection and well mixing should be taken into consideration for further research.

12.4. Conclusion

According to this preliminary research, we can conclude that the best sample for the isolation of alkalophilic spore-forming bacteria is plaster mortar, which was the one external environmental sample used. Laboratory samples present lower bacterial diversity, so they are not a good source for biotechnologically relevant isolates. All isolated strains induced precipitation of substances on the surface of their cells while grown on a solid medium. However, strains 1 and 8, were identified as having a positive result in rapid urease tests, so they were selected for further study. The reference strain (*Bacillus sphaericus*) was also used for experiments because it is one of the most commonly used microorganisms for research on microbiologically induced precipitation of calcium carbonate. The identification of the bacterial strain 1 was inconclusive as, according to 16S rRNA gene – based identification, it was *Arthrobacter crystallopoietes*; according to API tests: *Bacillus pumilus*. Taking into consideration the spore formation, the API tests-based identification would be more probable. In the case of strain 8, identification as *B. cereus* is the most probable. The strains used in the research differs in the efficacy of precipitate production, which could be caused by the differences in enzyme production.

Despite the fact that the crystal substance precipitation while growing on a solid microbiological medium, the ability to self-seal cracks in the beams was not confirmed. These results point to the necessity of spores protection against environmental factors that influence geopolymer with a chosen method of encapsulation or immobilization. It would also be required to enhance urease production by laboratory adaptation prior to the bacteria usage in geopolymer production. Also, proper mixing of the geopolymers with bacterial suspension is

important to obtain a relatively even distribution of the bacterial cells in the geopolymer beams.

The change in the geopolymer content by adding substrates necessary for bacterial growth and performance – urea and calcium hydroxide – causes a decrease in material density and, thus, an increase in the porosity of the geopolymer. The changes in the geopolymer composition in the proportion of the components resulted in a significant reduction in the flexural and compressive strength of the geopolymer. That is why the optimization of the geopolymer composition is required. As it was stated, the proportion between the required components of geopolymer – metakaolin, sodium hydroxide, water glass and microbial suspension with the components required for the self-healing process (urea and calcium hydroxide) heavily influences the geopolymer strength.

Acknowledgement

Aleksandra Ziemińska-Buczyńska is financed by the Faculty of Power and Environmental Engineering of the Silesian University of Technology with the grant no: 08/070/BK_23/0024 (BK-253/RIE7/2023). The research are financially supported with the project entitled: Reuse of Mining Waste into Innovative Geopolymeric-based Structural Panels, Precast, Ready Mixes and In-situ Applications, contract no. 645696.

Bibliography

1. Ozturk, M. Arslan, G.: Shear Behavior of Granulated Blast Furnace Slag-Based Geopolymer-Reinforced Concrete Beams, “Buildings”, Vol. 12, 2022, p. 2053, <https://doi.org/10.3390/buildings12122053>.
2. Mikula J., Łach M.: Geopolimery - nowa przyjazna środowisku alternatywa dla betonów na bazie cementu portlandzkiego. Wprowadzenie, „Rozwiązania proekologiczne w zakresie produkcji: nowoczesne materiały kompozytowe przyjazne środowisku”, 2014a, p. 13–32.
3. Rajczyk K., Giergiczny E., Szota M.: Mikrostruktura i właściwości stwardniałych spoiw geopolimerowych z popiołu lotnego, „Prace Instytutu Ceramiki i Materiałów Budowlanych”, Vol. 23, 2015, p. 79–89.
4. Fujita Y., Grant Ferris F., Lawson R.D., Colwell F.S., Smith R.W.: Calcium carbonate precipitation by ureolytic subsurface bacteria, “Geomicrobiology Journal”, Vol. 17, 2020, p. 305–318.

5. Krajewska B., Raczak K.: Podstawy i możliwości wykorzystania procesu biomineralizacji węgla wapnia, „Ochrona Środowiska”, Vol. 41/1, 2019, p. 31–37.
6. Li Q., Zhang B., Ge Q., Yang X.: Calcium carbonate precipitation induced by calcifying bacteria in culture experiments: influence of the medium on morphology and mineralogy, “International Biodeterioration & Biodegradation”, Vol. 134, 2018, p. 83–92.
7. Beściak G., Śmiszek-Lindert W., Lewicka S.: Biobeton – materiał budowlany przyszłości?, „Cement Wapno Beton”, Vol. 2, 2018, p. 137–143.
8. Chaparro-Acuña S.P., Becerra-Jiménez M.L., Martínez-Zambrano J.J., Rojas-Sarmiento H.A.: Soil bacteria that precipitate calcium carbonate: mechanism and applications of the process, “Acta Agronómica”, Vol. 67/2, 2018, p. 277–288.
9. Anbu P., Kang C.-H., Shin Y.-J., So J.-S.: Formations of calcium carbonate minerals by bacteria and its multiple applications, “Springerplus”, Vol. 5, 2016, p. 250.
10. Hammes F., Boon N., de Villiers J., Verstraete W., Siciliano S.D.: Strain-specific ureolytic microbial calcium carbonate precipitation, “Applied and Environmental Microbiology”, Vol. 69/8, 2003, p. 4901–4909.
11. Turner S., Pryer K.M., Miao V.P.W., Palmer J.D.: Investigating deep phylogenetic relationships among cyanobacteria and plastids by small subunit rRNA sequence analysis, “Journal of Eukaryotic Microbiology”, Vol. 46/4, 1999, p. 327–338.
12. Parvathi A., Krishna K., Jose J., Joseph N., Nair S.: Biochemical and molecular characterization of *Bacillus pumilus* isolated from coastal environment in Cochin, India, “Brazilian Journal of Microbiology”, Vol. 40, 2009, p. 2.
13. Skóra J., Gutarowska B.: Analiza wybranych czynników wirulencji bakterii i drożdży izolowanych ze środowisk pracy w kompostowniach, garbarniach, muzeach, „Medycyna Środowiskowa”, Vol. 17/3, 2014, p. 52–61.
14. Annamalai N., Thavasi R., Vijayalakshmi S., Balasubramanian T.: Extraction, purification and characterization of thermostable, alkaline tolerant α -amylase from *Bacillus cereus*, “Indian Journal of Microbiology”, Vol. 51/4, 2011, p. 424–429.
15. Mols M., Abee T.: Role of ureolytic activity in *Bacillus cereus* nitrogen metabolism and acid survival, “Applied and Environmental Microbiology”, Vol. 74/8, 2008, p. 2370–2378.
16. Ezechukwu I., Singal M., Igbinsola O.: *Aerococcus viridans*: case report, microbiology, and literature review, “American Journal of Case Reports”, Vol. 20, 2019, p. 697–700.
17. Martín V., Vela A.I., Gilbert M., Cebolla J., Goyache J., Domínguez L., Fernández-Garayzábal J.F.: Characterization of *Aerococcus viridans* isolates from swine clinical specimens, “Clinical Veterinary Microbiology”, Vol. 45/9, 2007, p. 3053–3057.
18. Kowalska M., Małczak E.: Identyfikacja drobnoustrojów występujących w cukrze, melasie, wyciągach plantatorskich i suszonych, „Postępy Nauki i Technologii Przemysłu Rolno-Spożywczego”, Vol. 71/4, 2016, pp. 46–58.
19. Clausen O.G.: The discovery, isolation and classification of various alpha-hemolytic micrococci which resemble *Aerococci*, “Journal of General Microbiology”, Vol. 35, 1964, p. 1–8.
20. Solaiman D.K.Y., Ashby R.D., Birbir M., Caglayan P.: Antibacterial activity of sophorolipids produced by *Candida bombicola* on Gram-positive and Gram-negative

- bacteria isolated from salted hides, "Journal of the American Leather Chemists Association", Vol. 111, 2016, p. 358–364.
21. Huang Y., Zhao N., He L., Wang L., Liu Z., You M., Guan F.: *Arthrobacter scleromae* sp. nov. isolated from human clinical specimens, "Journal of Clinical Microbiology", Vol. 43/3, 2005, p. 1451–1455.
 22. Mages I.S., Frodl R., Bernard K. A., Funke G.: Identities of *Arthrobacter* spp. and *Arthrobacter*-like bacteria encountered in human clinical specimens, "Journal of Clinical Microbiology", Vol. 46/9, 2008, p. 2980–2986.
 23. Busse H.-J., Wieser M., Buczolits S.: Genus *Arthrobacter* Conn and Dimmick 1947, 301AL emend. Koch, Schumann and Stackbrandt 1995, 838, "Bergey's Manual of Systematics of Archaea and Bacteria", Vol. 5, 2012, p. 578–624.
 24. Mikuła J., Łach M.: Geopolimery – nowa przyjazna środowisku alternatywa dla betonów na bazie cementu portlandzkiego. Przykłady wdrożenia i wyniki badań, „Rozwiązania proekologiczne w zakresie produkcji: nowoczesne materiały kompozytowe przyjazne środowisku”, 2014b, p. 33–56.
 25. Wang J., Soens H., Verstraete W., De Belie N.: Self-healing concrete by use of microencapsulated bacterial spores, "Cement and Concrete Research", Vol. 56, 2014, p. 139–152.

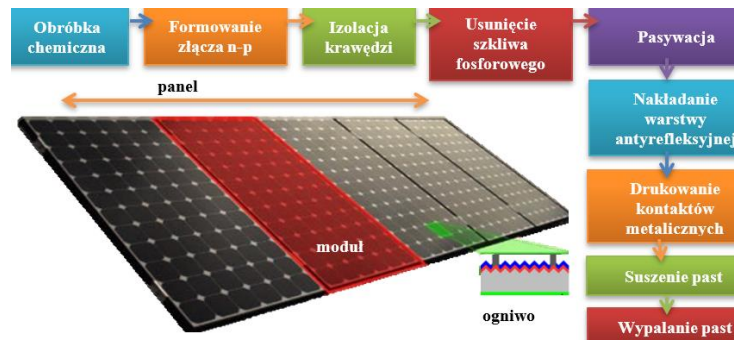
13. WYBRANE METODY BADAŃ MATERIAŁÓW FOTOWOLTAICZNYCH I OGNIW SŁONECZNYCH

13.1. Wprowadzenie

Na Wydziale Mechanicznym Technologicznym Politechniki Śląskiej wykonywane są prace badawcze dotyczące wielu aspektów związanych z podniesieniem sprawności ogniw fotowoltaicznych zarówno nieorganicznych, jak i organicznych. Prace te poparte są dużym doświadczeniem w rozwiązywaniu problemów badawczych w dziedzinie inżynierii materiałowej, ze szczególnym uwzględnieniem obróbki powierzchni [1–2].

Obecnie rynek fotowoltaiczny zdominowany jest przez ogniwa krzemowe. Krzem jest drugim, najczęściej występującym pierwiastkiem na Ziemi, a jego własności są bardzo dobrze poznane ze względu na jego istotną rolę w przemyśle elektronicznym. Ogniwa słoneczne wykonane z krzemu monokrystalicznego osiągają sprawności 21,4% w produkcji seryjnej i wykazują stabilność warunków pracy w długotrwałej eksploatacji. Ponadto w 2021 roku zarejestrowano rekord sprawności osiągniętej przez komercyjne monokrystaliczne ogniwa słoneczne, który wyniósł 24,9% (firma JinkoSolar). Konieczność zmniejszenia kosztów produkcji spowodowała zainteresowanie krzemem polikrystalicznym, lecz ogniwa słoneczne z niego wykonane cechuje mniejsza wytrzymałość i niższa sprawność niż ogniw z krzemu monokrystalicznego [3, 4]. Standardową technologię wytwarzania ogniwa fotowoltaicznego z wykorzystaniem technologii grubowarstwowej przedstawiono na rysunku 13.1.

Technologia ta jest skomplikowana i składa się z wielu etapów, z których każdy wymaga odpowiedniej kontroli. W niniejszym rozdziale przedstawiono wybrane metody badań materiałów stosowanych w fotowoltaice i ogniw słonecznych [3–5].



Rys. 13.1. Technologia wytwarzania krystalicznych krzemowych ogniw słonecznych [1, 4]
 Fig. 13.1. Manufacturing technology of crystalline silicon solar cells [1, 4]

13.2. Wybrane metody badań cienkich warstw stosowanych w ogniwach słonecznych

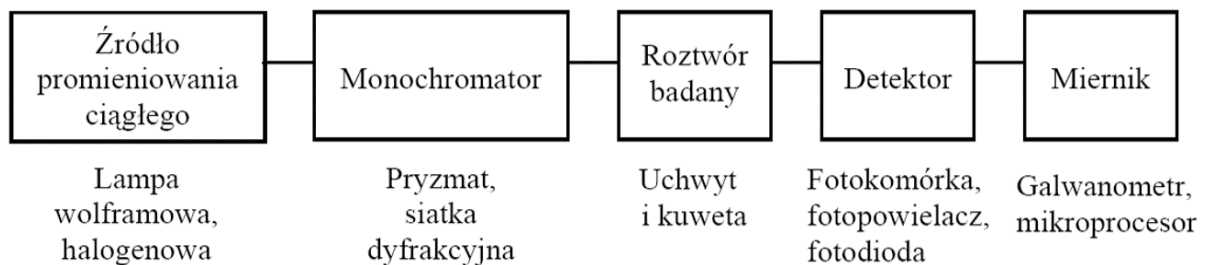
Zastosowanie cienkich warstw w budowie urządzeń optoelektronicznych i fotowoltaicznych ma na celu zwiększenie wykorzystania fizycznego potencjału materiału podłoża. Zatem modyfikacja powierzchni podłoża krzemowego, w celu uzyskania większej efektywności oraz lepszego dopasowania własności do konkretnego zastosowania, jest jednym z największych wyzwań w badaniach nad materiałami fotowoltaicznymi. Technologie nanoszenia warstw są zróżnicowane, w zależności od efektu, jaki ma być uzyskany oraz od materiału, z którego powstaje warstwa. W praktyce najczęściej stosuje się metodę chemicznego osadzania z fazy gazowej (CVD) oraz fizycznego osadzania z fazy gazowej (PVD). W ostatnich latach, w literaturze światowej obserwuje się zwiększone zainteresowanie materiałami tlenkowymi. Coraz bardziej pożądane są nowoczesne materiały o zadanych, ściśle określonych własnościach takich, jak np. własności antyrefleksyjne, wysoka przezroczystość, własności hydrofilowe lub hydrofobowe, dobre przewodnictwo elektryczne, własności mechaniczne [6, 7].

Jedną z podstawowych metod badań własności optycznych cienkich warstw jest spektrometria UV-VIS. Do badań wykorzystywany jest obszar widma promieniowania elektromagnetycznego od 200–780 nm. Niektóre aparaty umożliwiają pomiar nawet do 1100 nm. Długość fali w tym obszarze podaje się najczęściej w nanometrach. Możliwe jest badanie zarówno próbek litych, proszkowych, jak i cieczy. Widmo w obszarze UV/Vis nazywane jest elektronowym widmem absorpcyjnym, jednakże ściśle rzecz ujmując jest ono widmem elektronowo-oscyłacyjno-rotacyjnym. Energia cząsteczki jest sumą energii elektronowej, oscyłacyjnej i rotacyjnej. Przy użyciu

spektrofotometrii możliwe jest zbadanie zjawisk zachodzących pomiędzy padającą wiązką światła a materiałem: odbicie, transmisja i absorbcja. Współczynnik odbicia światła (reflektancja) R (ang. coefficient of reflection lub reflectivity) zdefiniowany jest jako stosunek natężenia promieniowania odbitego I_r do natężenia promieniowania padającego I_i [6–8]:

$$R = \frac{I_r}{I_i}. \quad (13.1)$$

Pomiary własności optycznych wykonuje się z wykorzystaniem spektrofotometru. Można wyróżnić pięć podstawowych podzespołów spektrometru: źródło światła, monochromator, miejsce na próbkę, fotodetektor oraz urządzenie odczytujące dane (rys. 13.2).



Rys. 13.2. Budowa prostego spektrofotometru
Fig. 13.2. Construction of a simple spectrophotometer

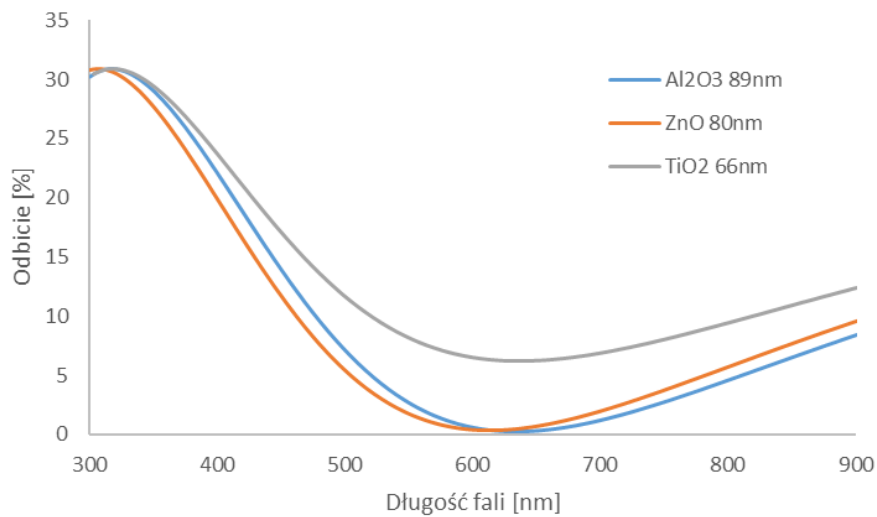
Aktualne spektrofotometry są znacznie bardziej skomplikowanymi i rozbudowanymi urządzeniami. Na Wydziale Mechanicznym Technologicznym Politechniki Śląskiej badania własności optycznych wykonuje się na spektrofotometrze UV-Vis Evolution 220 firmy Thermo Scientific (rys. 13.3). Jest to spektrofotometr dwuwiazkowy, w którym przy badaniu roztworów wiązka promieniowania ze źródła jest rozdzielana przez odpowiedni układ na dwie, równorzędne wiązki przechodzące równoległe – pierwsza przez roztwór wzorcowy, druga przez roztwór badany.

W celu zmniejszenia odbicia od przedniej powierzchni ogniwa słonecznego stosuje się cienkie warstwy antyrefleksyjne, których własności optyczne można wyznaczyć przy użyciu spektrofotometru. Umożliwia on pomiar odbicia całkowitego w wybranym zakresie. Jednowarstwowe pokrycia antyrefleksyjne umożliwiają zmniejszenie odbicia tylko w wąskim zakresie (rys. 13.4).

W związku z tym, w celu efektywnego obniżenia odbicia światła w szerokim zakresie, stosuje się układy dwuwarstwowe lub wielowarstwowe (rys. 13.5).



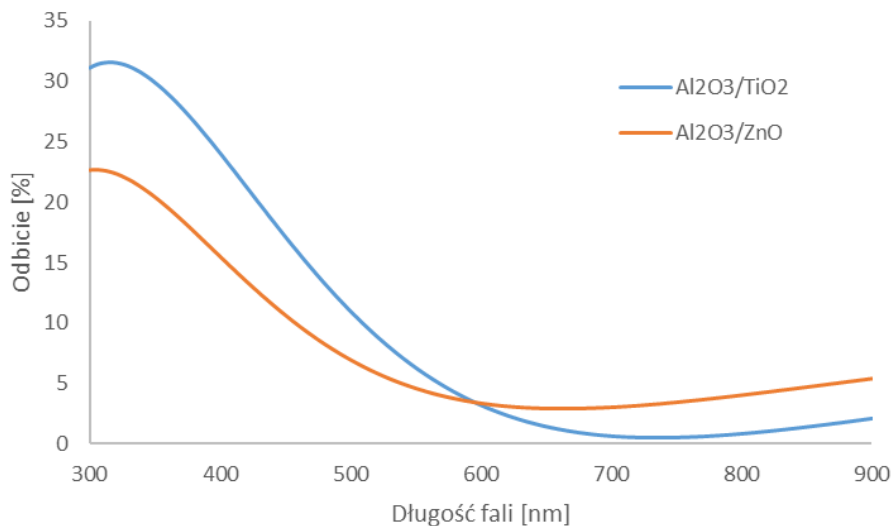
Rys. 13.3. Spektrofotometr Evolution 220 firmy Thermo Scientific
 Fig. 13.3. Evolution 220 spectrophotometer from Thermo Scientific



Rys. 13.4. Odbicie światła od powierzchni krzemu pokrytego jednowarstwową powłoką antyrefleksyjną
 Fig. 13.4. Reflection of light from the surface of silicon covered with a single-layer anti-reflective coating

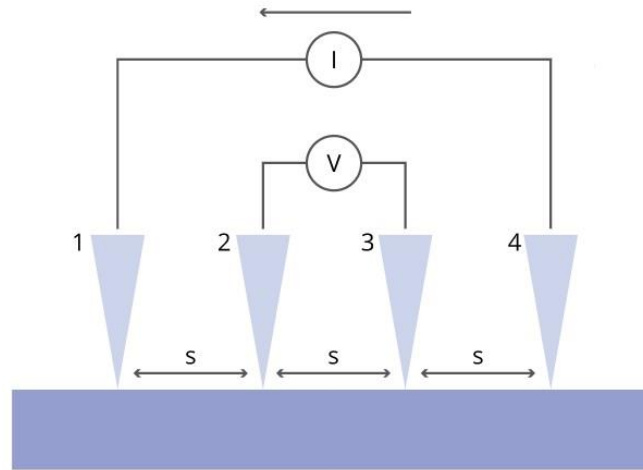
Podobnie jak własności optyczne, istotne znaczenie mają również własności elektryczne osadzanych cienkich warstw na krzemowych ogniwach słonecznych. Coraz częściej stosuje się transparentne tlenki przewodzące (ang. transparent conductive oxide TCO) w postaci cienkiej warstwy w strukturze ogniwa słonecznego. Zastosowanie warstwy przewodzącej zapewnia zachowanie właściwości optycznych, dedykowanych dla warstw antyrefleksyjnych i dodatkowo umożliwia szybsze odseparowanie nośników od elektrody metalowej ogniwa słonecznego, czego nie zapewniają takie materiały jak SiN_x, TiO₂ i SiO₂. W większości urządzeń optoelektronicznych niezbędne jest stosowanie elektrod przepuszczających

promieniowanie elektromagnetyczne, w szczególności z zakresu światła widzialnego oraz bliskiej podczerwieni. Do najczęściej stosowanych TCO należy tlenek indowocynowy (ITO). Podstawową wielkością umożliwiającą określenie przydatności warstwy TCO do jej konkretnego zastosowania jest rezystancja powierzchniowa. Jest to zdolność materiału do ograniczania przepływu prądu elektrycznego po jego powierzchni, która zależy od rodzaju materiału oraz struktury i czystości jego powierzchni. Liczbowo jest równa stosunkowi napięcia stałego, przyłożonego do elektrod stykających się z tą samą powierzchnią materiału do wartości natężenia prądu płynącego po powierzchni między tymi elektrodami, z wyłączeniem składowej prądu płynącego na skróś materiału, odniesionemu do odległości między elektrodami i długości elektrod. Jednostką jest Ω/\square [Om/Kwadrat]. Wielkość tę mierzy się z wykorzystaniem sondy czterostrzowej. Pomiar rezystancji powierzchniowej płytki krzemowej za pomocą sondy czterostrzowej polega na opuszczeniu czterech igieł sondy ustawionych liniowo na powierzchnię płytki i przepuszczeniu prądu o określonym natężeniu przez płytkę między zewnętrznymi igłami, natomiast między wewnętrznymi igłami mierzony jest spadek napięcia. Należy zaznaczyć, że igły rozmieszczone są w równych odstępach [8–10]. Schemat ideowy sondy czteropunktowej przedstawiono na rysunku 13.6.



Rys. 13.5. Odbicie światła od powierzchni krzemu pokrytego jednowarstwową powłoką antyrefleksyjną

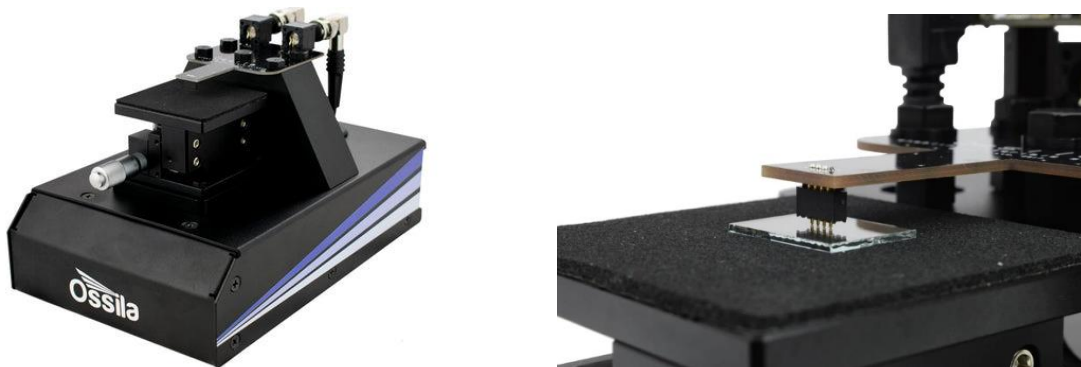
Fig. 13.5. Reflection of light from the surface of silicon covered with a single-layer anti-reflective coating



Rys. 13.6. Schemat ideowy sondy czteroostrowej
Fig. 13.6. A schematic diagram of a four-point probe

Na Wydziale Mechanicznym Technologicznym Politechniki Śląskiej pomiar rezystancji powierzchniowej wykonuje się z wykorzystaniem sondy czteroostrowej firmy Ossila (rys. 13.7) oraz urządzenia Sherescan firmy Sunlab.

Układy te, po zdefiniowaniu geometrii próbki, umożliwiają pomiar rezystancji powierzchniowej, rezystywności oraz przewodności cienkich warstw półprzewodnikowych i przewodzących. Na rysunku 13.8 przedstawiono przykładowy wynik pomiaru cienkiej warstwy ITO o grubości 100 nm.



Rys. 13.7. Sonda czteroostrowa firmy Ossila
Fig. 13.7. Ossila four-point probe system

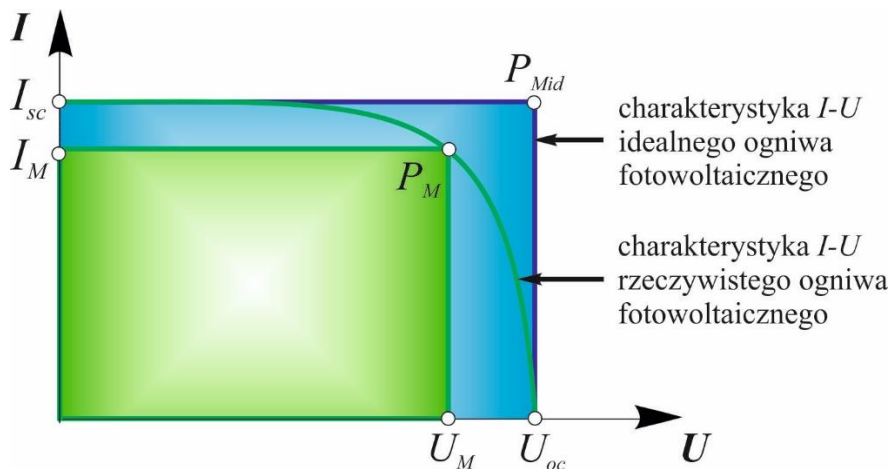


Rys. 13.8. Przykładowy wynik pomiaru cienkiej warstwy ITO o grubości 100 nm
Fig. 13.8. An example of the measurement result of a ITO thin film with a thickness of 100 nm

13.3. Wyznaczanie własności elektrycznych ogniw fotowoltaicznych na podstawie pomiarów charakterystyk prądowo-napięciowych

Jedne z największych wyzwań przemysłu fotowoltaicznego to zwiększenie wydajności ogniw słonecznych i redukcja kosztów ich produkcji. Najistotniejszym czynnikiem determinującym przydatność i opłacalność wykorzystania fotoogniw jest sprawność konwersji energii promieniowania słonecznego na energię elektryczną [11,12]. Po wytworzeniu ogniwa słonecznego pierwszą wykonywaną czynnością jest pomiar charakterystyk prądowo-napięciowych ($I-U$), na podstawie których wyznaczane są podstawowe własności elektryczne ogniw fotowoltaicznych, takie jak: prąd zwarcia I_{SC} , prąd w punkcie mocy maksymalnej I_M , napięcie obwodu otwartego, napięcia w punkcie mocy maksymalnej U_M , moc maksymalna P_M , współczynnik wypełnienia FF , sprawność E_{ff} [13,14]. Charakterystyka prądowo-napięciowa to wykres zależności prądu w funkcji napięcia, która dla idealnego ogniwa słonecznego miałaby kształt prostokąta o bokach I_{SC} , U_{OC} (rys. 13.9) [15]. Jego maksymalna moc P_{Mid} jest równa iloczynowi [16]:

$$P_{Mid} = U_{OC} I_{SC}. \quad (13.2)$$



Rys. 13.9. Przykładowa charakterystyka prądowo-napięciowa oświetlonego ogniwa fotowoltaicznego [17–19]

Fig. 13.9. Example current-voltage characteristics of an illuminated solar cell [17–19]

Maksymalna moc P_M rzeczywistego ogniwa jest zawsze mniejsza od idealnego i wynosi [16, 17]:

$$P_M = U_M I_M. \quad (13.3)$$

Współczynnik wypełnienia FF określa, w jakim stopniu charakterystyka prądowo-napięciowa jest zbliżona do idealnej (czyli prostokąta o bokach U_{OC} , I_{SC}) i obliczany jest z zależności [18]:

$$FF = \frac{U_{MIM}}{U_{oc}I_{sc}} = \frac{P_M}{P_{Mid}}. \quad (13.4)$$

Za urządzenia wysokiej klasy uważa się ogniwa fotowoltaiczne o współczynniku wypełnienia powyżej 0,75 [15].

Jednym z najważniejszych wyznaczników przydatności ogniwa fotowoltaicznego jest sprawność E_{ff} , która określa procentowy stosunek wyprodukowanej ilości energii elektrycznej do dostarczonej do urządzenia energii słonecznej. Jest ona zdefiniowana jako [19]:

$$E_{ff} = FF \frac{U_{oc}I_{sc}}{P_m A_0} \cdot 100\%. \quad (13.5)$$

Na Wydziale Mechanicznym Technologicznym Politechniki Śląskiej znajduje się system do pomiaru charakterystyk prądowo-napięciowych firmy PV Test Solutions Tadeusz Żdanowicz, wyposażony w [20]:

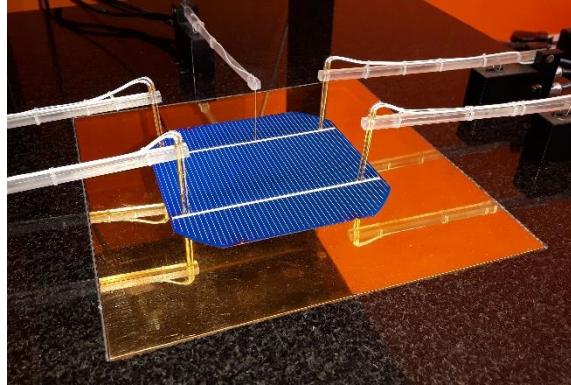
- symulator światła słonecznego firmy Photo Emission Tech., Inc. (rys. 13.10a) klasy AAA (zgodnie z normą IEC 60904-09),
- układ pomiarowy wraz z systemem akwizycji danych,
- stolik pomiarowy z sondami (rys. 13.10b) oraz jednostkę kontroli temperatury stolika (rys. 13.10c),
- miernik Keithley 2401 (rys. 13.10d),
- uchwyty pomiarowe do badania barwnikowych (DSSCs) (rys. 13.10e), polimerowych i perowskitowych (PSCs) ogniw fotowoltaicznych.

Przed przystąpieniem do pomiarów stanowisko kalibrowane jest za pomocą ogniwa wzorcowego. Dzięki zainstalowanemu oprogramowaniu Solar Cell Tester możliwe jest sterowanie pomiarem z poziomu komputera i wyznaczenie podstawowych własności elektrycznych. Urządzenie pozwala na pomiar w tzw. warunkach STC (ang. Standard Test Conditions), tj. natężenie promieniowania słonecznego 1000 W/m^2 , widmo AM 1,5 oraz temperatura ogniwa 25°C . Temperatura stolika jest regulowana przez kontroler grzewczo-chłodzący, który umożliwia pomiar w zakresie temperatury $\sim 0\text{--}60^\circ\text{C}$. Przykładową charakterystykę prądowo-napięciową ogniwa słonecznego przedstawiono na rysunku 13.11.

a)



b)



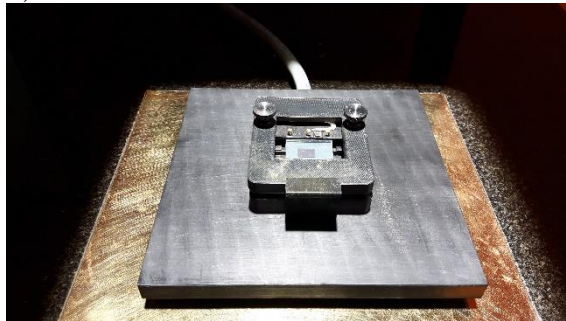
c)



d)

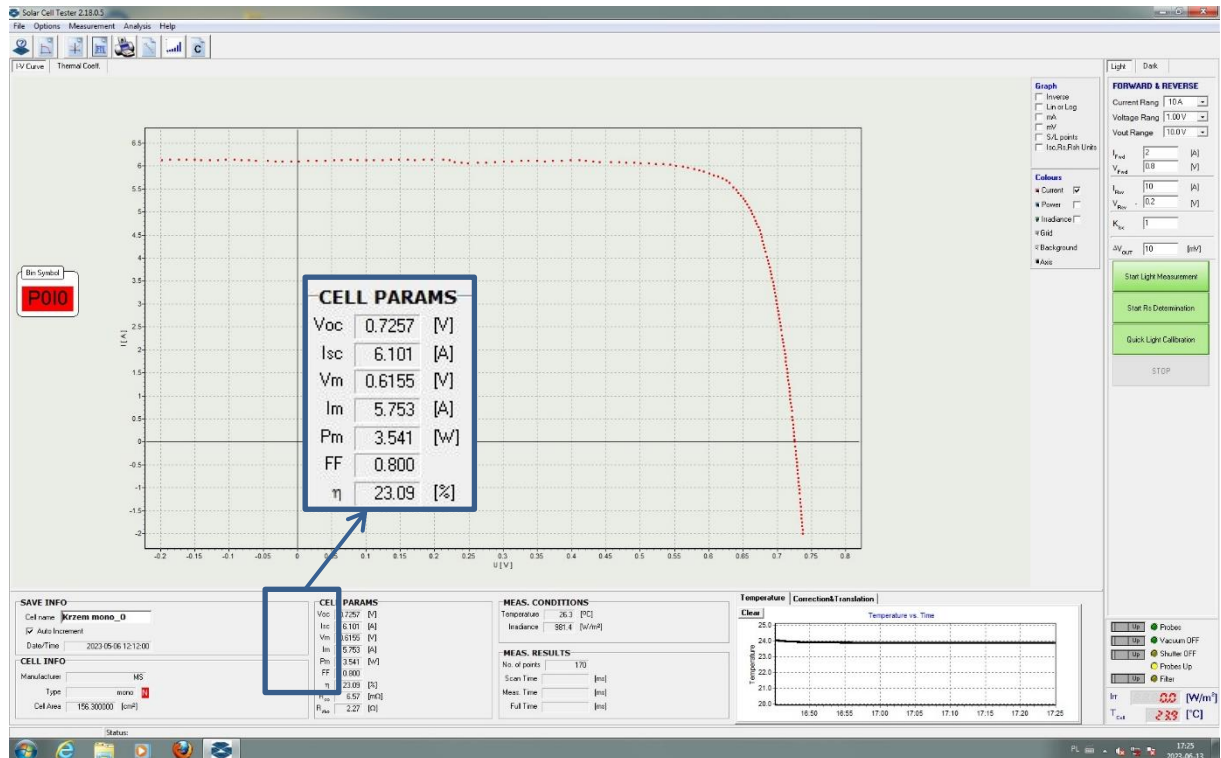


e)



Rys. 13.10. Wybrane elementy stanowiska do pomiaru charakterystyk I-U: a) symulator promieniowania słonecznego, b) stolik pomiarowy z sondami, c) grzewczo-chłodzący kontroler, d) miernik Keithleya, e) uchwyt pomiarowy do badania DSSCs

Fig. 13.10. Selected elements of the system for measuring I-U characteristics: a) solar simulator, b) measuring table with probes, c) heating and cooling controller, d) Keithley meter, e) DSSCs holder



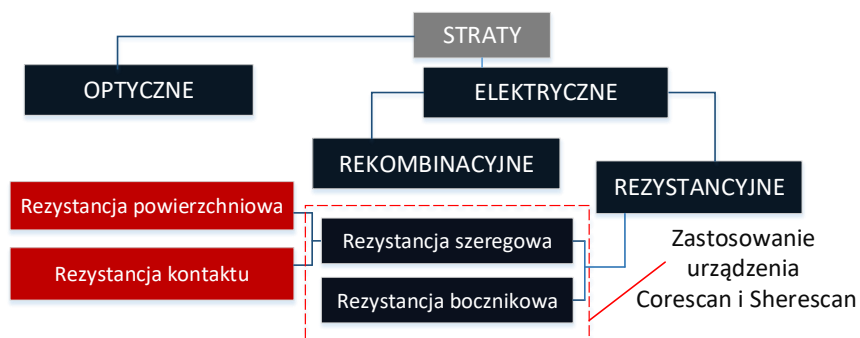
Rys. 13.11. Widok strony głównej programu Solar Cell Tester z przykładową charakterystyką prądowo-napięciową monokrystalicznego krzemowego ogniwa fotowoltaicznego

Fig. 13.11. View of the main window of the Solar Cell Tester program with an example of the current-voltage characteristics of a monocrystalline silicon solar cell

13.4. Badanie wybranych parametrów własności elektrycznych z wykorzystaniem urządzeń Corescan i Sherescan

Obecnie wiele renomowanych ośrodków naukowo-badawczych z całego świata stosuje różne metody pomiarowe, służące optymalizacji warstw i elementów struktur elektronowych w trakcie procesu technologicznego, w warunkach laboratoryjnych i przemysłowych. W dalszym ciągu poszukiwane są zarówno nowe, jak i proste rozwiązania, które dostarczą użytkownikowi (w miarę szybki sposób) pełny obraz informacji na temat badanego przedmiotu [21]. Napięcie obwodu otwartego ogniwa, prąd zwarcia, współczynnik wypełnienia, maksymalna moc możliwa do uzyskania oraz sprawność konwersji fotowoltaicznej są to wielkości, jakie zalicza się do zewnętrznych parametrów pracy, charakteryzujących krzemowe ogniwo słoneczne. Wielkości te zależne są także od czynników technologicznych, zdeterminowanych wpływem procesu wytwarzania na parametry materiałowe i fizyczne poszczególnych warstw i elementów konstrukcyjnych ogniwa słonecznego. Do najważniejszych z tych parametrów należy zaliczyć: współczynnik odbicia promieniowania

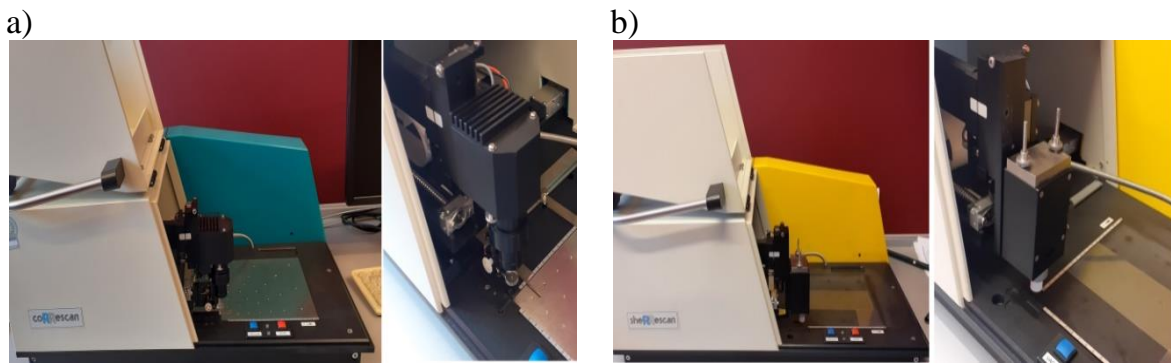
elektromagnetycznego, grubość materiału bazowego ogniwa, koncentracja nośników ładunku, ich ruchliwość oraz czas życia nośników ładunku, długość drogi dyfuzji nośników ładunku, prędkość rekombinacji powierzchniowej, rezystancję i rezystywność obszarów i elementów konstrukcyjnych ogniwa, a także rodzaje i koncentrację defektów oraz wynikająca z nich gęstość centrów rekombinacyjnych [22]. Opracowanie zawiera elementarną wiedzę z zakresu wybranych metod oraz narzędzi badawczych stosowanych do wyznaczania zasadniczych parametrów elektrycznych płytek półprzewodnikowych oraz ogniw słonecznych. W efekcie uzyskane i odpowiednio opracowane wyniki badań mogą służyć optymalizacji i kontroli wybranych etapów procesu technologicznego wytwarzania gotowego już ogniwa słonecznego [23–26]. Proces konwersji fotowoltaicznej w ogniwie słonecznym jest pozbawiony pełnych możliwości w związku z licznymi stratami, których pochodzenie jest determinowane stratami fundamentalnymi (m.in. brakiem absorpcji fotonów o energii mniejszej od przerwy energetycznej materiału bazowego, udziałem fotonów wysokoenergetycznych, generujących tylko jedną parę nośników ładunku i tracących nadmiarową energię w postaci promieniowania cieplnego) oraz technologicznymi ogniwa (m.in. współczynnikiem zakrycia i odbicia, współczynnikiem niecałkowitej absorpcji spowodowanej ograniczoną grubością materiału) [27]. Urządzenia Sherescan i Corescan służą do pomiaru wybranych własności elektrycznych płytek półprzewodnikowych oraz ogniw słonecznych, umożliwiając analizę strat powodowanych przez czynniki fundamentalne, z uwzględnieniem ich bezpośredniego wpływu na dany parametr elektryczny urządzenia fotowoltaicznego (rys. 13.12) [28].



Rys. 13.12. Przykładowa klasyfikacja strat mocy ogniwa słonecznego
 Fig. 13.12. Exemplary classification of solar cell power losses

Firma SunLab (spin-off ECN'u) zaprojektowała urządzenia Corescan i Sherescan (rys. 13.13), natomiast firma Mechatronics (na licencji SunLab) je wyprodukowała i dostarczyła na rynek światowy w 2000 roku [28]. Obecnie wspomniane urządzenia

znajdują się na wyposażeniu Katedry Materiałów Inżynierskich i Biomedycznych, Politechniki Śląskiej w Gliwicach.

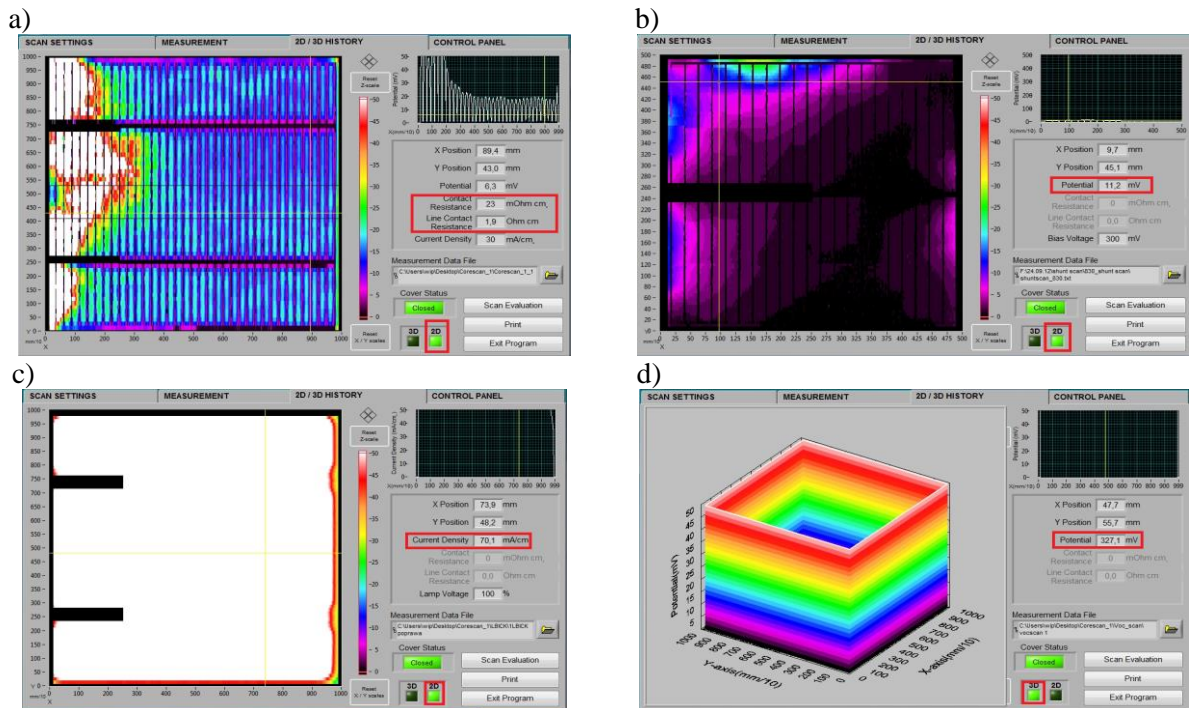


Rys. 13.13. Urządzenie: a) Corescan i b) Sherescan do badania własności elektrycznych płytek półprzewodnikowych i ogniw słonecznych

Fig. 13.13. Device: a) Corescan and b) Sherescan for testing the electrical properties of semiconductor wafers and solar cells

W urządzeniu Corescan pomiar wykonuje się z wykorzystaniem metalowej sondy pomiarowej w formie pojedynczej igły. Oprogramowanie urządzenia umożliwia pomiar w czterech trybach [29]:

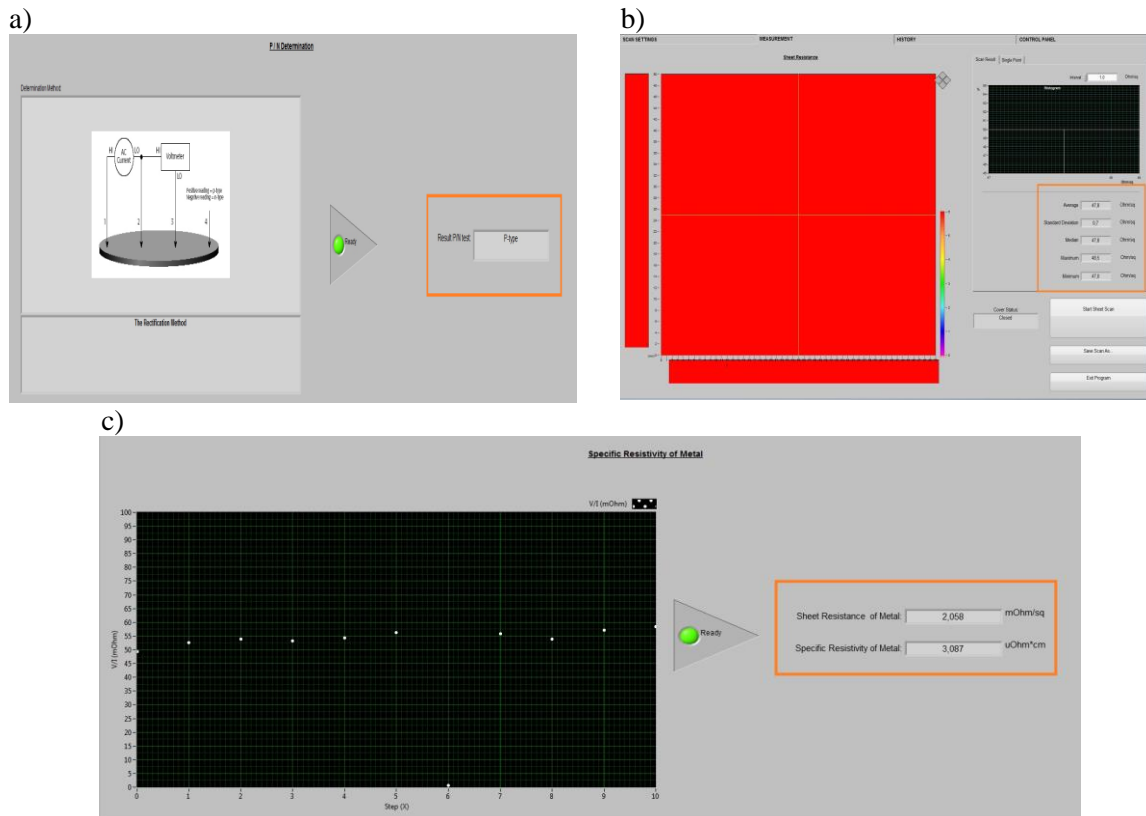
1. *Core scan* – służy do optymalizacji nanoszenia przedniej metalizacji ogniw słonecznych. W tym trybie stosuje się metodę różnicy potencjałów PD (ang. Potential Differences), która polega na tym, że w trakcie pomiaru próbka jest zwarta odbiornikiem zewnętrznym, prąd jest generowany w wyniku miejscowego oświetlenia obszaru na próbce, a napięcie jest mierzone przyłożoną sondą do przedniej metalizacji tej próbki. W wyniku pomiaru uzyskuje się wartość rezystancji na styku metal-półprzewodnik oraz rezystywność nadrukowanej przedniej metalizacji na powierzchni próbki (rys. 13.14a).
2. *Shunt scan* – służy do zlokalizowania upływów (np. wzdłuż krawędzi ogniwa, dyslokacji i granic ziarn) oraz innych defektów strukturalnych występujących w ogniwie słonecznym. W wyniku pomiaru uzyskuje się wartość napięcia obwodu otwartego (V_{oc}) (rys. 13.14b).
3. *LIBC scan* – stosuje się do określania obszarów o zmniejszonym czasie życia nośników, a w efekcie uzyskuje się wartość gęstości fotoprądu ogniwa słonecznego (rys. 13.14c).
4. *$V_{oc} scan$* – wykorzystuje się do zidentyfikowania obszarów o zwiększonej rekombinacji nośników, a w rezultacie otrzymuje się rozkład napięcia obwodu otwartego (U_{oc}) ogniwa słonecznego bez naniesionych kontaktów (rys. 13.14d).



Rys. 13.14. Przykładowe wyniki badań uzyskane w różnych trybach, prezentowane w oprogramowaniu Corescan: a) Core scan, b) Shunt scan, c) LIBC scan, d) Voc scan
 Fig. 13.14. The examples of data in different modes presented within the Corescan software a) Core scan, b) Shunt scan, c) LIBC scan, d) Voc scan

W urządzeniu Sherescan pomiar wykonuje się z wykorzystaniem metalowej sondy czterostrzowej. Oprogramowanie urządzenia umożliwia pomiar w trzech trybach [30]:

1. *Typ przewodności P/N* – stosuje się do rozpoznania typu przewodności krzemowej płytki (rys. 13.15a).
2. *Rezystancji powierzchniowej* – wykorzystuje się do pomiaru rezystancji powierzchniowej krzemu oraz oceny jakości wytworzonych warstw dyfuzyjnych emitera (w jednym lub wielu punktach); wyniki pomiarów uzyskuje się w formie graficznej (wykres, mapa) lub tekstowej (analiza statystyczna, tj. wartości średnia, maksymalna i minimalna, odchylenie standardowe) (rys. 13.15b).
3. *Rezystancji kontaktu* – pozwala na pomiar rezystancji właściwej przedniego kontaktu ogniwa słonecznego (rys. 13.15c).



Rys. 13.15. Przykładowe wyniki badań otrzymane w różnych trybach prezentowane w oprogramowaniu Sherescan: a) typu rozpoznania P/N, b) rezystancji powierzchniowej, c) rezystancji kontaktu

Fig. 13.15. The examples of data in different modes presented within the Sherescan software: a) P/N recognition type, b) sheet resistance, c) metal resistance

13.5. Podsumowanie

W ostatnim czasie klimat w skali globalnej znacznie się zmienia, co wiąże się z coraz większym zagrożeniem dla środowiska, ludzkiego zdrowia i gospodarki. Ponadto światowe zapotrzebowanie na energię elektryczną stale wzrasta. Odnawialne źródła energii (OZE) to przyszłość energetyki, nadzieja na ograniczenie zanieczyszczenia środowiska oraz uniezależnienia się od tradycyjnych dostaw energii. Technologia wytwarzania ogniw fotowoltaicznych jest skomplikowana i składa się z wielu etapów. Naukowcy na całym świecie prowadzą badania dążąc do zwiększenia zarówno ich sprawności, jak i zmniejszenia kosztów produkcji. W celu oceny jakości wytworzonych ogniw słonecznych konieczna jest kontrola własności optoelektrycznych na różnych etapach ich wytwarzania. Metody badawcze, przedstawione w ramach niniejszej pracy, stanowią doskonałe narzędzia do optymalizacji i diagnozowania technologii wytwarzania ogniw fotowoltaicznych.

Bibliografia

1. Drygała A., Dobrzański L.A., Szindler M., et al.: Influence of laser texturization surface and atomic layer deposition on optical properties of polycrystalline silicon, *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 41/18, 2016, p. 7563–7567.
2. Mousa H.M., Shabat M.M., Karmoot M.R.: Double layer antireflection coating design for conductive solar cells, *Romanian Reports In Physics*, Vol. 72/4, 2020, p.1–18.
3. Szindler M., Szindler M.M., Kulesza-Matlak G.: The Al₂O₃/TiO₂ double antireflection coating deposited by ALD method, *Opto-Electronics Review*, Vol. 30, 2022, p. 1–6.
4. Marks-Bielska R. et al.: The importance of renewable energy sources in Poland's energy mix., *Energies*, Vol. 13, 2020, p. 1–23.
5. Hou G.J., Garcia I., Rey-Stolle I.: High-low refractive index stacks for broadband antireflection coatings for multijunction solar cells, *Solar Energy*, Vol. 217, 2021, p. 29–39.
6. Szindler M., Szindler M.M., Boryło P., Jung T.: Structure and optical properties of TiO₂ thin films deposited by ALD method, *Open Phys*, Vol. 15, 2017, pp. 1067–1071.
7. Zhang W. et al.: Broadband graded refractive index TiO₂/Al₂O₃/MgF₂ multilayer antireflection coating for high efficiency multi-junction solar cell, *Sol. Energy*, Vol. 217, 2021, p. 271–279.
8. Picollo M., Aceto M., Vitorino T.: UV-Vis spectroscopy, *Phys Sci Rev*, Vol. 4/4, 2019, p. 29–34.
9. Li M.Y., Yang M., et. al.: Analysis of variance on thickness and electrical conductivity measurements of carbon nanotube thin films, *Material Science Technol*, Vol. 27, 2016, p. 1–12.
10. ASTM F390-98 2003 Standard Test Method for Sheet Resistance of Thin Metallic Films with a Collinear Four-Probe Array (ASTM International).
11. Akinoglu B., Tuncel B., Badescu V.: Beyond 3rd generation solar cells and the full spectrum project. Recent advances and new emerging solar cells, *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, Vol. 46, 2021, 101287.
12. Zhou H., Fu Y.-K., Li N., Zhang C., Zhang F.: The impacts of generation efficiency and economic performance on the solar power generation and storage scale: An empirical analysis of 20 countries, *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 44, 2021, 101084.
13. Gul M., Kotak Y., Muneer T.: Review on recent trend of solar photovoltaic technology. *Energy Exploration & Exploitation*, Vol. 34/4, 2016, p. 485–526.
14. Dambhare M.V., Butey B., Moharil S.V.: Solar photovoltaic technology: A review of different types of solar cells and its future trends, *Journal of Physics: Conference Series*, Vol. 1913, 2021, 012053.
15. Dittrich T.: Basic characteristics and characterization of solar cells. *Materials concepts for solar cells*, 2nd edition, World Scientific, Singapore 2018.
16. Sarniak M.T.: Podstawy fotowoltaiki, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2008.
17. Prokopiuk vel Prokopowicz M., Szindler M., Dobrzański L.A., Drygała A.: Wyznaczanie własności elektrycznych krzemowych ogniw fotowoltaicznych, *Prace Studenckich Kół Naukowych "SO-KÓŁ'14"*. Red. Mirosław Bonek, Vol. 29, 2014, p. 63–68.

18. Drygała A., Szindler M., Szindler M.M., Dobrzański L.A.: Badania własności elektrycznych ogniw fotowoltaicznych, Laboratoria Aparatura Badania LAB, Vol. 2, 2018, p. 22–26.
19. Drygała A., Szindler M.: Badanie własności elektrycznych materiałów fotowoltaicznych. Praca zbiorowa pod redakcją naukową L.A. Dobrzańskiego i T. Tańskiego, Ćwiczenia laboratoryjne z inżynierii materiałowej i nanotechnologii, Open Access Library, Vol. 10 2013, p. 136–139.
20. Dokumentacja techniczna urządzenia Solar Cells I-V Curve Tracer SS I-V CT-02.
21. Musztyfaga-Staszuk M.: Application of the transmission line method (TLM) to measure the resistivity of contacts, „Monografia”, Vol. 955, 2022, Politechnika Śląska, s. 92, ISBN 978-83-7880-861-9.
22. Szlufcik J.: Principles of Crystalline Silicon Solar Cells, Lecture in NATO Advanced Study Institute – Photovoltaic and Photoactive Materials - Properties, Technology and Applications, 11th-22nd September, Sozopol, Bulgaria 2001.
23. Musztyfaga-Staszuk M.: Nowe kompozyty na bazie miedzi w zastosowaniu do wytwarzania krzemowych ogniw fotowoltaicznych „Monografia”, Vol. 778, 2019, Politechnika Śląska, s. 161, ISBN 978-83-7880-626-4.
24. Jarzębski Z.M.: Energia Słoneczna – Konwersja Fotowoltaiczna, PWN, Warszawa 1990.
25. Klugmann-Radziemska E.: Fotowoltaika w teorii i praktyce, BTC, Legionowo 2010.
26. Rodacki T., Kandyba A.: Przetwarzanie energii w elektrowniach słonecznych, WPS, Gliwice 2000.
27. Zięba P., Panek P., Drabczyk K., Lipiński M.: Materiały Szkoleniowe, Upowszechnienie osiągnięć polskiej oraz światowej fotowoltaiki w procesie kształcenia na poziomie wyższym. Laboratorium Fotowoltaiczne IMIM PAN, Kraków 2009.
28. dane na stronie: <https://www.energy-xprt.com/downloads/sunlab-model-corescan-mapping-of-metal-grid-contact-resistance-datasheet-736296>.
29. dane na stronie: <https://www.energy-xprt.com/products/?keyword=CORESCAN>.
30. dane na stronie: <https://www.energy-xprt.com/products/?keyword=SHERESCAN>.

14. REDUKCJA KOSZTÓW ENERGETYCZNYCH PRZEWIETRZANIA PRZEZ OPTYMALIZACJĘ SIECI WENTYLACYJNEJ I ZASTOSOWANIE REKUPERACJI W PODZIEMNYM OBIEKCIE TURYSTYCZNYM

14.1. Wprowadzenie

Górny Śląsk w ostatnim dwudziestoleciu przeszedł ogromną przemianę. Do końca XX wieku był kojarzony typowo jako miejsce przemysłu ciężkiego, związane z wydobyciem węgla i produkcją stali. Obecnie, tak jak cała Polska i świat, przechodzi ciągłą transformację, przemieniając zamykane kopalnie, huty, zakłady przemysłowe w obiekty kultury, tworząc tak zwane zabytki techniki i przemysłu [1–7]. Ustawa Prawo geologiczne i górnicze [8], a także ustawa o ochronie gruntów rolnych i leśnych [9] określają, że obowiązkiem przedsiębiorcy górniczego jest likwidacja i rekultywacja obszaru przekształconego w wyniku działalności wydobywczej. Zagospodarowanie (rewitalizacja) należy do przyszłego użytkownika zrekultywowanego obszaru. Sposób likwidacji i rekultywacji musi być podporządkowany sposobowi późniejszego zagospodarowania. Zagospodarowanie zlikwidowanych kopalń węgla kamiennego i terenów po ich likwidacji jest procesem bardzo trudnym i długotrwałym. Stwarza jednak duże możliwości w zakresie uczynienia regionu atrakcyjnym przez wykreowanie funkcji o zasięgu ponadregionalnym, właśnie na bazie, powstałych w wyniku działalności wydobywczej, przekształceń. W Polsce istnieje kilka obiektów podziemnych, które są udostępnione turystom i przewietrzane za pomocą wentylatorów (między innymi Zabytkowa kopalnia Guido, KS Wieliczka, KS Bochnia). Są to były kopalnie, gdzie przed zakończeniem wydobycia dokonano zmiany systemu przewietrzania. Typowym przykładem transformacji są obiekty Muzeum Górnictwa Węglowego w Zabrze, w którego skład wchodzi między innymi Kopalnia Guido oraz Sztolnia Królowa Luiza. Są to obiekty podziemne, przygotowane i udostępnione do ruchu turystycznego. W kopalni Guido istnieją dwa poziomy udostępnione do zwiedzania – 170 m oraz poziom 300 m (dodatkowo z udostępnionymi wyrobiskami na poziomie 320 m). Natomiast w Sztolni Królowa

Luiza są udostępnione poziomy I, II i III, gdzie wyznaczone zostały trasy turystyczne, obejmujące dawne wyrobiska kopalni Królowa Luiza. Sztolnia Królowa Luiza została odbudowana i rozbudowana o tak zwaną nową część. W Sztolni prezentowane są eksponaty przedstawiające maszyny górnicze z lat 70. XX wieku. W ramach turystyki przemysłowej prowadzone są pokazy działających maszyn górniczych, takich jak: strug ścianowy, wrębiarka, ładowarka zasięrzutna i kombajn ścianowy. Dla zwiedzających udostępniono ponadto wyrobiska dojściowe do szybu Wyzwolenie oraz szyb Wyzwolenie, umożliwiając turystom przejazd z poziomu 5 m na poziom 40 m i kontynuację zwiedzania w wyrobiskach Głównej Kluczowej Sztolni Dziedzicznej. Część trasy turystycznej obejmuje wyrobiska, w których zabudowane zostały urządzenia kolei podziemnej. W wyrobiskach tych ruch turystyczny odbywa się w formie przejazdu górniczą kolejką szynową oryginalnymi wagonikami, przeznaczonymi do transportu ludzi, ciągniętymi przez lokomotywę akumulatorową typu Karlik [10–11].

Prowadzenie działalności muzealnej i turystycznej w podziemnych obiektach pociąga za sobą ponoszenie wielu kosztów, związanych między innymi z utrzymaniem odpowiedniej wentylacji dla zapewnienia właściwych parametrów powietrza (składu chemicznego, temperatury, wilgotności), zarówno dla zwiedzających, jak i dla zabytkowej obudowy wyrobisk, maszyn, urządzeń oraz eksponatów. Przeprowadzając optymalizację sieci wentylacyjnej między innymi przez minimalizację ilości powietrza, zmianę parametrów pracy wentylatorów, sposób przewietrzania, ogrzewanie lub chłodzenie powietrza, zastosowanie rekuperacji, można w znaczący sposób ograniczyć koszty przewietrzania [12–16].

14.2. Materiał i metody

Sztolnia Królowa Luiza jest podziemnym obiektem turystycznym, zlokalizowanym w byłych wyrobiskach górniczych. Obiekty Sztolni podlegają zarówno Prawu budowlanemu – elementy nadziemne, jak i Prawu geologicznemu i górnictwu – pozostała część Sztolni – elementy podziemne. Przewietrzanie Sztolni realizowane jest jak w czynnej kopalni węgla kamiennego, co podyktowane jest przepisami górnictwem [8, 17]. Do przewietrzania kopalni wykorzystywane są dwie stacje wentylatorów głównych. W jednej stacji, w tak zwanej starej części, zabudowano dwa wentylatory lutniowe typu WGL/KGC-6A o mocy 18,5 kW każdy, przy czym jeden wentylator pracuje, a drugi pełni funkcję wentylatora rezerwowego. Podobnie jest w drugiej

stacji, w tak zwanej nowej części, przy czym wentylatory mają moc 22 kW każdy. Praca wentylatorów zapewnia łącznie około 12 m³/s powietrza w całej Sztolni, po 6 m³/s na każdą z jej części. Projektując, a w przypadku Sztolni Królowa Luiza, modernizując sieć wentylacyjną, należy wszystkie czynności wykonać zgodnie z przepisami rozporządzenia [17], a w szczególności z regulacjami prawnymi zawartymi w Dziale III. Przewietrzanie. Według §142.1 i §142.2 ilość powietrza doprowadzana do wyrobisk ma zapewnić utrzymanie w wyrobiskach wymaganego składu powietrza i temperatury, a „dostępne wyrobiska i pomieszczenia przewietrza się w taki sposób, aby zawartość tlenu w powietrzu nie była mniejsza niż 19% objętościowo, a stężenie gazów w powietrzu było nie większe niż 1% dla dwutlenku węgla” [17]. „W zakładach górniczych wydobywających kopaliny niepalne oraz w zakładach prowadzących działalność określoną w art. 2 ust. 1 ustawy, w których nie występuje zagrożenie metanowe jest dopuszczalne stosowanie wentylatorów głównych umieszczonych w wyrobiskach, na warunkach określonych przez kierownika ruchu zakładu górniczego albo zakładu” (§151.3 [17]).

Zapotrzebowanie na energię elektryczną wentylatora w pierwszej stacji wynosi:

$$N_{w1} = \dot{V}_1 \cdot \Delta p_1, \quad (14.1)$$

gdzie:

N_{w1} – moc wentylatora w pierwszej stacji, W,

\dot{V}_1 – strumień objętości powietrza płynącego przez wentylator w pierwszej stacji, m³/s,

Δp_1 – spiętrzenie wentylatora w pierwszej stacji, Pa.

$$N_{w1} = 6,0 \cdot 920 = 5520 \text{ W}$$

Zapotrzebowanie na energię elektryczną wentylatora w drugiej stacji wynosi:

$$N_{w2} = \dot{V}_2 \cdot \Delta p_2, \quad (14.2)$$

gdzie:

N_{w2} – moc wentylatora w drugiej stacji, W,

\dot{V}_2 – strumień objętości powietrza płynącego przez wentylator w drugiej stacji, m³/s,

Δp_2 – spiętrzenie wentylatora w drugiej stacji, Pa.

$$N_{w2} = 6,0 \cdot 1000 = 6000 \text{ W}$$

Zapotrzebowanie dzienne i roczne na energię wentylatora w pierwszej stacji wynosi:

$$E_{w1d} = \frac{24 \cdot N_{w1}}{1000 \cdot \eta_1}, \quad (14.3)$$

$$E_{w1r} = \frac{24 \cdot 365 \cdot N_{w1}}{1000 \cdot \eta_1}, \quad (14.4)$$

gdzie:

E_{w1d} – zapotrzebowanie dzienne na energię do zasilania wentylatora w pierwszej stacji, kWh,

E_{w1r} – zapotrzebowanie roczne na energię do zasilania wentylatora w pierwszej stacji, kWh,

η_1 – sprawność wentylatora w pierwszej stacji.

$$E_{w1d} = \frac{24 \cdot 5520}{1000 \cdot 0,63} = 210,3 \text{ kWh}$$

$$E_{w1r} = \frac{24 \cdot 365 \cdot 5520}{1000 \cdot 0,63} = 76754 \text{ kWh} = 76,754 \text{ MWh}$$

Zapotrzebowanie dzienne i roczne na energię wentylatora w drugiej stacji wynosi:

$$E_{w2d} = \frac{24 \cdot N_{w2}}{1000 \cdot \eta_2}, \quad (14.5)$$

$$E_{w2r} = \frac{24 \cdot 365 \cdot N_{w2}}{1000 \cdot \eta_2}, \quad (14.6)$$

gdzie:

E_{w2d} – zapotrzebowanie dzienne na energię do zasilania wentylatora w drugiej stacji, kWh,

E_{w1r} – zapotrzebowanie roczne na energię do zasilania wentylatora w drugiej stacji, kWh,

η_2 – sprawność wentylatora w drugiej stacji.

$$E_{w1d} = \frac{24 \cdot 6000}{1000 \cdot 0,65} = 221,5 \text{ kWh}$$

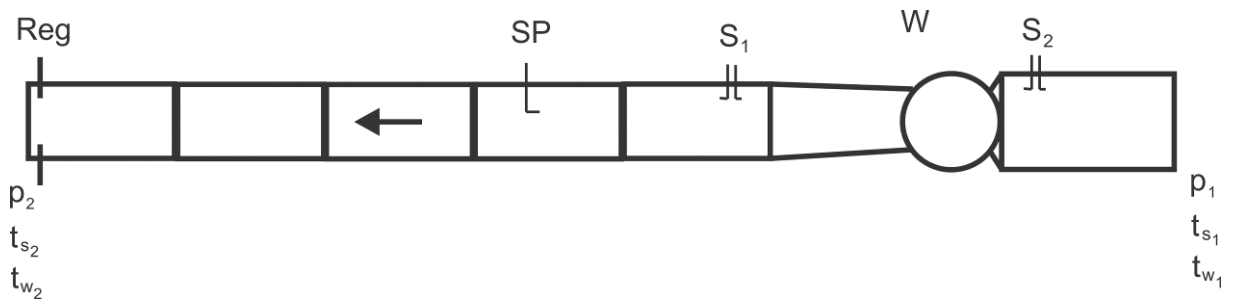
$$E_{w1r} = \frac{24 \cdot 365 \cdot 6000}{1000 \cdot 0,65} = 80861 \text{ kWh} = 80,861 \text{ MWh}$$

Łącznie zapotrzebowanie roczne na energię elektryczną przez stacje wentylatorów wynosi 157,615 MWh.

Dodatkowo obiekt prowadzi swoją działalność przez cały rok, a to powoduje, iż w okresie zimowym konieczne jest ogrzewanie powietrza tak, aby we wszystkich jego wyrobiskach panowała dodatnia temperatura. W celu zapewnienia właściwych warunków klimatycznych powietrze wpływające do Sztolni jest dodatkowo ogrzewane. W związku z tym, każda redukcja całkowitej ilości powietrza przepływającego przez Sztolnię zmniejsza koszt energetyczny. Średnio do podgrzania 1 m³/s powietrza o jeden stopień (z 0°C do 1°C) niezbędne jest zainstalowanie nagrzewnicy o mocy około 1,08 kW.

W celu optymalizacji sieci wentylacyjnej Sztolni konieczne było opracowanie projektu przewietrzania. W projekcie założono, że dopuszczalne będzie, zgodnie z przepisami [17] oraz za zgodą Kierownika Ruchu Zakładu, obniżenie ciśnienia wentylatorów głównego przewietrzania poniżej 785 Pa. Podobne rozwiązania zastosowane zostały w innych restrukturyzowanych kopalniach [18–19]. Ponadto w każdym wyrobisku Sztolni należało zapewnić właściwą ilość powietrza, zgodnie z wymaganiami norm i przepisów [8, 17], oraz właściwy skład chemiczny powietrza (nieprzekroczenie dopuszczalnych maksymalnych stężeń). W projekcie przewidziano regulację parametrów pracy wentylatorów głównych na pierwszej stacji przez zastosowanie falowników. Zmniejszenie ilości powietrza płynącego wyrobiskami Sztolni ograniczać będzie również koszty związane z ogrzewaniem powietrza w okresie zimowym.

W celu realizacji założeń projektowych przeanalizowano sieć wentylacyjną Sztolni, głównie w zakresie liczby wlotów i wylotów powietrza, wykonano pomiary sieci wentylacyjnej, dokonano bilansu powietrza, określono wielkości strat (rys. 14.1) – wykonano tak zwany cyfrowy model sieci. Wszystkie pomiary i obliczenia bilansu powietrza wykonano przy użyciu barometrów, anemometrów skrzydełkowych oraz z wykorzystaniem programów komputerowych [20–21]. Następnie przeanalizowano możliwości zmiany parametrów pracy wentylatorów – wykonano charakterystyki pracy wentylatorów głównych przy wykorzystaniu falownika oraz z zastosowaniem schematu pomiarowego, przedstawionego na rys. 14.2. Kolejno zmniejszono natężenie prądu zasilającego wentylator w „starej” części, przez zmniejszenie na falowniku częstotliwości prądu z 50 Hz na 40 Hz i jednocześnie ograniczono ilość powietrza wpływającą przez świetlik w warsztacie elektrycznym, przepływającą przez stację ładowania akumulatorów (przez zabudowanie okna regulacyjnego w kanale wentylacyjnym), przepływającego przez Karczmę Gibald oraz zabudowano wlot do otworu W(2016) i wyposażono go w okno regulacyjne, za pomocą którego można regulować ilość powietrza przepływającą przez poziom III. Zabudowano okno regulacyjne w świetliku nr 3, pozwalające na większą kontrolę ilości powietrza przepływającego przez pochylnię IIIz, zabudowano okno regulacyjne na otworze W(2015a), regulujące ilość powietrza w pochylni granicznej.



Legenda:

Reg – zasuwa regulacyjna,

SP – sonda pomiarowa – ciśnienie dynamiczne, statyczne i całkowite, Pa,

S_1 – sonda pomiarowa – ciśnienie statyczne za wentylatorem, Pa,

S_2 – sonda pomiarowa – ciśnienie statyczne przed wentylatorem, Pa,

W – wentylator,

p_1 – ciśnienie barometryczne przed wentylatorem, Pa,

p_2 – ciśnienie barometryczne za zasuwą, Pa,

t_{s1} – temperatura powietrza mierzona termometrem suchym przed wentylatorem, °C,

t_{s2} – temperatura powietrza mierzona termometrem suchym za zasuwą, °C,

t_{s1} – temperatura powietrza mierzona termometrem wilgotnym przed wentylatorem, °C,

t_{s1} – temperatura powietrza mierzona termometrem wilgotnym za zasuwą, °C.

Rys. 14.2. Schemat pomiarowy wentylatora [źródło: opracowanie autorskie]

Fig. 14.2. Fan measurement diagram [source: author's study]

Pomierzone wydatki powietrza w poszczególnych bocznicach sieci wentylacyjnej Sztolni przedstawiono w tabeli 14.1. W bocznicach (wyrobiskach), gdzie nie były zmierzone wydatki powietrza, wyznaczono je na podstawie równań Kirchhoffa [20, 21]. Wyrównanie sieci wykonano za pomocą dostępnych programów komputerowych [20, 21]. Charakterystyki wentylatorów zostały wykonane in situ. Do celów pracy wykonano charakterystyki w układach: wydajność wentylatora pracującego w badanym układzie – spiętrzenie wentylatora (pomiędzy wlotem do układu a wylotem z lutni za wentylatorem), wydajność wentylatora pracującego w badanym układzie – moc użyteczna wentylatora (pomiędzy wlotem do układu a wylotem z lutni za wentylatorem) oraz wydajność wentylatora pracującego w badanym układzie – sprawność ogólna wentylatora (pomiędzy wlotem do układu a wylotem z lutni za wentylatorem).

Moc elektryczną wentylatorów odczytywano na licznikach zamontowanych przy falownikach oraz dla sprawdzenia przez ręczne pomiary za pomocą watomierzy elektronicznych.

Tabela 14.1

Wydatki powietrza w poszczególnych bocznicach przed zmianą parametrów sieci i wentylatora

Lp.	Nazwa wyrobiska	Od wyrobiska	Do wyrobiska	Wydatek powietrza, m ³ /min
1	W (2016), Chodnik pokazowy, Chodnik główny poz. II	Powierzchnia	Pochylnia IVz	90
2	Pochylnia IVz, Chodnik główny poz. III	Chodnik główny poz. II	Chodnik główny poz. II	80
3	Chodnik główny poz. II	Chodnik główny poz. III	Poczekalnia	100
4	Pochylnia IIIz	Świetlik 3	Chodnik podstawowy	140
5	Świetlik 3	Powierzchnia	Pochylnia IIIz	100
6	W (2015A), Pochylnia graniczna	Powierzchnia	Wytyczna wschodnia	160
7	Przekop równoległy	Przekop zachodni	Komora kompresorów	40
8	Przekop zachodni	Pochylnia IIIz	Przekop równoległy	30
9	Przekop zachodni	Przekop równoległy	Przekop kierunkowy do szybu „Wyzwolenie”	65
10	Przekop kierunkowy do szybu „Wyzwolenie”	Przekop zachodni	Chodnik łączący	200
11	Szyb „Wyzwolenie”	Powierzchnia	Świetlik 7	40
12	Świetlik 7	Powierzchnia	Przekop kierunkowy do szybu „Wyzwolenie”	130
13	Świetlik 6	Powierzchnia	Warsztat elektryczny	30
14	Świetlik	Powierzchnia	Warsztat elektryczny	60
15	Chodnik łączący	Świetlik	Przekop kierunkowy do szybu „Wyzwolenie”	30
16	Upadowa z powierzchni	Powierzchnia	Chodnik „Guibald”	60
17	Przekop główny poz. I	Chodnik „Guibald”	Chodnik podścianowy	195
18	Przekop główny poz. I	Chodnik podścianowy	Wytyczna wschodnia	170
19	Wytyczna wschodnia	Przekop główny poz. I	Przekop wentylacyjny „Wyzwolenie”	100
20	Chodnik wyjściowy	Powierzchnia	Przecznica I	80
21	Przecznica I	Chodnik wyjściowy	Zajezdnia lokomotyw	80
22	Zajezdnia lokomotyw	Przecznica I	Kanał wentylacyjny	40
23	Chodnik taśmowy	Przecznica I	Chodnik 2aw	60
24	Chodnik 2aw, Chodnik 3aw	Chodnik taśmowy	Magistrala odstawy urobku	60
25	Magistrala odstawy urobku	Chodnik 3aw	SO1	200
26	Przecznica I	Wytyczna wschodnia	Pochylnia IIw	80
27	Pochylnia IIw	Kanał wentylacyjny	Przekop wentylacyjny „Wyzwolenie”	300
28	Szyb „Wyzwolenie”	Pochylnia IIw	Powierzchnia	360
29	Otwór W (2015)	Chodnik główny	Powierzchnia	360

W celu sporządzenia pełnej charakterystyki wentylatora dla co najmniej sześciu różnych położenia tamy regulacyjnej (zasuwy w kanale wentylacyjnym) jednocześnie pomierzono: temperaturę powietrza (mierzoną termometrem: suchym i wilgotnym), wilgotność względną powietrza i ciśnienie atmosferyczne, różnicę ciśnień statycznych przez umieszczenie rurki statycznej pomiędzy zasuwą a wlotem do wentylatora, strumień objętości powietrza (wydatek, wydajność), prędkość obrotową wentylatora oraz moc na zaciskach silnika elektrycznego wentylatora.

Ponadto dla nominalnych (przy maksymalnej sprawności) i przewidywanych parametrów pracy wykonano pomiar hałasu. Mając powyższe dane pomiarowe, w układzie współrzędnych prostokątnych wykreślono: krzywą całkowitego spiętrzenia wentylatora Δp , w zależności od jego wydatku \dot{V} , krzywą mocy na wale wentylatora N_w , w zależności od wydatku \dot{V} , oraz krzywą sprawności η_w wentylatora, w zależności od wydatku \dot{V} . Charakterystyki zostały wykonane dla gęstości powietrza wynoszącego $1,2 \text{ kg/m}^3$, co wymagało przeliczenia charakterystyk.

W stacji wentylatorów Sztolni dokonano pomiarów parametrów stanu powietrza wilgotnego, wyznaczono strumień objętości powietrza oraz dokonano pomiarów ciśnień (całkowitego, statycznego i dynamicznego). Do pomiarów parametrów stanu powietrza wilgotnego wykorzystano psychrometr Assmanna do pomiaru temperatur termometru suchego i wilgotnego oraz barometr do pomiaru ciśnienia barometrycznego. Do wyznaczenia strumienia objętości powietrza wykorzystano anemometr skrzydełkowy do pomiaru prędkości przepływu powietrza oraz miarkę centymetrową i dalmierz, w celu pomiaru przekroju. Do pomiaru ciśnień (całkowitego, dynamicznego i statycznego) wykorzystano sondę Prandtla z odpowiednio przyłączonymi przyrządami do pomiaru różnicy ciśnień: U-rurką i mikromanometrem z rurką pochyłą.

Przed wlotem do wentylatora dokonywano pomiaru ciśnienia barometrycznego p_1 , temperatur psychrometrycznych t_{s1} i t_{w1} . W punkcie S_1 dokonywano pomiaru ciśnienia statycznego S_1 . W punkcie S_2 dokonywano pomiaru ciśnienia statycznego S_2 . W punkcie SP ciśnienia: dynamicznego, całkowitego i statycznego. Na końcu lutniociągu dokonywano regulacji przepływu powietrza za pomocą zasuw regulacyjnej i dokonywano pomiarów ciśnienia barometrycznego p_2 , temperatur psychrometrycznych t_{s2} i t_{w2} . Przy wentylatorze W dokonywano pomiaru napięcia U i natężenia prądu I .

Projekt wentylacyjny zawierał również elementy umożliwiające poprawę warunków klimatycznych w okresie zimowym, w szczególności przez podniesienie temperatury powietrza. Dotychczas w Sztolni podgrzewano powietrze za pomocą

specjalnych nagrzewnic zainstalowanych w świetliku nr 7. Nie zawsze ta metoda pozwalała na wyeliminowanie możliwości zamarzania rurociągów przeciwpożarowych oraz zapewnienie ogrzania całego obiektu w taki sposób, aby we wszystkich wyrobiskach i ich sąsiedztwie panowała dodatnia temperatura, co ograniczało degradację i erozję górotworu (wyeliminowanie przemarzania górotworu). W celu poprawy systemu ogrzewania Sztolni w okresie zimowym wykonano odwodnienie dachu warsztatu elektrycznego, zainstalowano żaluzje w świetliku nr 7, co spowodowało większy kontakt powietrza napływającego przez ten świetlik z nagrzewnicą zainstalowaną w tym miejscu, rozszczelniono tamy TB-1 i TB-3 przez demontaż jednego z dolnych fartuchów w tamie TB-3 oraz demontaż szyby w oknie tamy TB-1, co spowodowało napływ ciepłego powietrza do Muzeum z budynku kasy. Na powierzchni zamontowano preizolowany kanał powietrzny łączący otwór W(2015) z otworem W(2016), umożliwiającą doprowadzenie ogrzanego powietrza na zasadzie częściowej recyrkulacji (rys. 14.3). Otwory W(2015) i W(2015a) połączono preizolowanym kanałem powietrznym, który umożliwił doprowadzenie ogrzanego powietrza do sztolni granicznej i do „nowej” części (rys. 14.4–14.6).



Rys. 14.3. Lutniociąg zainstalowany na powierzchni łączący otwór W(2015) z otworem W(2016) – rekuperacja [zdjęcie autorskie]

Fig. 14.3. The air duct installed at the surface for connecting the opening W(2015) with the opening W(2016) – the recuperation [author's photo]



Rys. 14.4. Lutniociąg zainstalowany na powierzchni łączący otwór W(2015) z otworem W(2016) i W(2015a) – rekuperacja – otwór W(2016) [zdjęcie autorskie]

Fig. 14.4. The air duct installed at the surface for connecting the opening W(2015) with the opening W(2016) and W(2015a) – the recuperation – the opening W(2016) [author's photo]



Rys. 14.5. Lutniociąg zainstalowany na powierzchni dla rekuperacji – otwór W(2015a) [zdjęcie autorskie]

Fig. 14.5. The air duct installed at the surface for the recuperation – the opening W(2015a) [author's photo]

14.3. Wyniki i wnioski

Przeprowadzone prace, zgodnie z założonymi celami, pozwoliły na ograniczenie ilości powietrza przepływającego przez wentylator zabudowany w „starej” części – otwór W (2015) – o około $1,7 \text{ m}^3/\text{s}$ (około $100 \text{ m}^3/\text{min}$) – z 6 na $4,33 \text{ m}^3/\text{s}$ (z $360 \text{ m}^3/\text{min}$ do $260 \text{ m}^3/\text{min}$), czyli o około 28% (tabela 14.2, rys. 14.6), co uzyskano przez zmianę częstotliwości prądu na falowniku i przy równoczesnym spadku napięcia wentylatora z 920 Pa do 700 Pa (rys. 14.7). Przez regulację zasuwy w świetliku nr 3 zredukowano wydatek powietrza z $1,67 \text{ m}^3/\text{s}$ ($100 \text{ m}^3/\text{min}$) na $1,0 \text{ m}^3/\text{s}$ ($60 \text{ m}^3/\text{min}$), czyli o 40%. Zasuwa regulacyjna, zamontowana w otworze W (2015A), pozwoliła na redukcję ilości powietrza wpływającego do „nowej” części Sztolni z $2,67 \text{ m}^3/\text{s}$ ($160 \text{ m}^3/\text{min}$) do $2 \text{ m}^3/\text{s}$ ($120 \text{ m}^3/\text{min}$), czyli o 25%. Zamontowanie zasuwy regulacyjnej w otworze W (2016) spowodowało ograniczenie ilości wpływającego powietrza do Sztolni z $1,5 \text{ m}^3/\text{s}$ ($90 \text{ m}^3/\text{min}$) do $0,67 \text{ m}^3/\text{s}$ ($40 \text{ m}^3/\text{min}$), czyli o około 55%. Zainstalowanie tamy regulacyjnej przy wlocie do Karczmy Guibald pozwoliło zmniejszyć przepływ powietrza przez Karczmę o około 67%, czyli z $0,5 \text{ m}^3/\text{s}$ ($30 \text{ m}^3/\text{min}$) do $0,17 \text{ m}^3/\text{s}$ ($10 \text{ m}^3/\text{min}$). Zasuwa regulacyjna w świetliku pozwoliła na redukcję przepływu powietrza w tym miejscu o około 33% – z $1 \text{ m}^3/\text{s}$ ($60 \text{ m}^3/\text{min}$) do $0,67 \text{ m}^3/\text{s}$ ($40 \text{ m}^3/\text{min}$). Przez uszczelnienie tamy przed wlotem do zajezdni lokomotyw pozwoliło na ograniczenie przepływu powietrza o 50% – z $0,67 \text{ m}^3/\text{s}$ ($40 \text{ m}^3/\text{min}$) do $0,33 \text{ m}^3/\text{s}$ ($20 \text{ m}^3/\text{min}$). Wyżej wymienione zabiegi pozwoliły również na ograniczenie wydatku wentylatora w „nowej” części o $1,67 \text{ m}^3/\text{s}$ ($100 \text{ m}^3/\text{min}$).

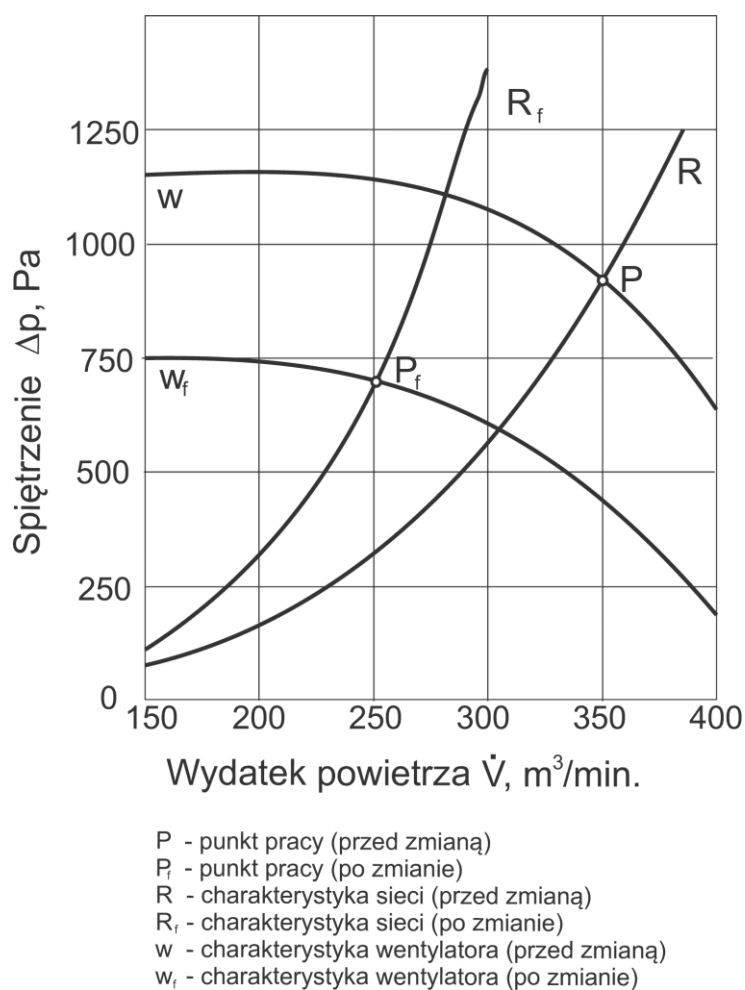
Dodatkowo przez wykonane prace w Sztolni zminimalizowano i poddano elektronicznej kontroli stężenia dwutlenku węgla (czujniki CO_2 połączone z dyspozytornią), aby mieściły się w granicach bezpiecznych. Uzyskano to przez regulację powietrza w świetliku doprowadzającym powietrze na poziomie III.

Tabela 14.2

Wydatki powietrza w poszczególnych bocznicach po zmianie parametrów sieci i wentylatora

Lp.	Nazwa wyrobiska	Od wyrobiska	Do wyrobiska	Wydatek powietrza, m ³ /min
1	W (2016), Chodnik pokazowy, Chodnik główny poz. II	Powierzchnia	Pochylnia IVz	40 (Zmniejszenie wydatku powietrza z 90 m ³ /min do 40 m ³ /min poprzez zainstalowanie zasuw regulacyjnej na wlocie do otworu W (2016))
2	Pochylnia IVz, Chodnik główny poz. III	Chodnik główny poz. II	Chodnik główny poz. II	30
3	Chodnik główny poz. II	Chodnik główny poz. III	Poczekalnia	90
4	Pochylnia IIIz	Świetlik 3	Chodnik podstawowy	100
5	Świetlik 3	Powierzchnia	Pochylnia IIIz	60 (Zmniejszenie wydatku powietrza ze 100 m ³ /min do 60 m ³ /min przez zainstalowanie zasuw regulacyjnej na wlocie do otworu W (2016))
6	W (2015A), Pochylnia graniczna	Powierzchnia	Wytyczna wschodnia	120 (Zmniejszenie wydatku powietrza ze 160 m ³ /min do 120 m ³ /min przez zainstalowanie zasuw regulacyjnej na wlocie do otworu W (2015A))
7	Przekop równoległy	Przekop zachodni	Komora kompresorów	40
8	Przekop zachodni	Pochylnia IIIz	Przekop równoległy	30
9	Przekop zachodni	Przekop równoległy	Przekop kierunkowy do szybu „Wyzwolenie”	65
10	Przekop kierunkowy do szybu „Wyzwolenie”	Przekop zachodni	Chodnik łączący	170
11	Szyb „Wyzwolenie”	Powierzchnia	Świetlik 7	30
12	Świetlik 7	Powierzchnia	Przekop kierunkowy do szybu „Wyzwolenie”	120
13	Świetlik 6	Powierzchnia	Warsztat elektryczny	20
14	Świetlik	Powierzchnia	Warsztat elektryczny	40 (Zmniejszenie wydatku powietrza z 60 m ³ /min do 40 m ³ /min przez zainstalowanie zasuw regulacyjnej na wlocie do świetlika)

15	Chodnik łączący	Świetlik	Przekop kierunkowy do szybu „Wyzwolenie”	20
16	Upadowa z powierzchni	Powierzchnia	Chodnik „Guibald”	40
17	Przekop główny poz. I	Chodnik „Guibald”	Chodnik podścianowy	145
18	Przekop główny poz. I	Chodnik podścianowy	Wytyczna wschodnia	120
19	Wytyczna wschodnia	Przekop główny poz. I	Przekop wentylacyjny „Wyzwolenie”	60
20	Chodnik wyjściowy	Powierzchnia	Przecznica I	60
21	Przecznica I	Chodnik wyjściowy	Zajezdnia lokomotyw	60
22	Zajezdnia lokomotyw	Przecznica I	Kanał wentylacyjny	20 (Zmniejszenie wydatku powietrza z 40 m ³ /min do 20 m ³ /min przez doszczelnienie tamy wentylacyjnej na wlocie do Zajezdni lokomotyw)
23	Chodnik taśmowy	Przecznica I	Chodnik 2aw	60
24	Chodnik 2aw, Chodnik 3aw	Chodnik taśmowy	Magistrala odstawy urobku	60
25	Magistrala odstawy urobku	Chodnik 3aw	SO1	120
26	Przecznica I	Wytyczna wschodnia	Pochylnia IIw	60
27	Pochylnia IIw	Kanał wentylacyjny	Przekop wentylacyjny „Wyzwolenie”	180
28	Szyb „Wyzwolenie”	Pochylnia IIw	Powierzchnia	260
29	Otwór W (2015)	Chodnik główny	Powierzchnia	260 (Zmniejszenie wydatku powietrza z 360 m ³ /min do 260 m ³ /min zmianę częstotliwości prądu na falowniku (z 60 Hz do 40 Hz))



Rys. 14.7. Zmiana punktu pracy wentylatora w pierwszej stacji
 Fig. 14.7. Changing the fan operating point at the first station

Wszystkie wymienione wyżej prace i uzyskane ograniczenia w ilości powietrza przepływającego przez wyrobiska Sztolni pozwoliły na obniżenie kosztów związanych z przewietrzaniem.

Zapotrzebowanie na energię elektryczną wentylatora w pierwszej stacji po optymalizacji sieci wyniosło:

$$N_{w1} = 4,33 \cdot 700 = 3033 \text{ W}$$

W związku ze zmniejszeniem ilości powietrza przepływającego przez całą Sztolnię, zmianie (zmniejszeniu) uległ również strumień objętości powietrza przepływającego przez drugą stację z 6 m^3/s (360 m^3/min) do 4,33 m^3/s (260 m^3/min). Wentylatory w drugiej stacji nie miały zamontowanego falownika, więc zmienił się punkt pracy wentylatora na charakterystyce i jednocześnie zwiększyło się ciśnienie wentylatora z 1000 Pa na 1100 Pa. Zapotrzebowanie na energię elektryczną wentylatora w drugiej stacji wyniosło:

$$N_{w2} = 4,33 \cdot 1100 = 4763 \text{ W}$$

Zapotrzebowanie dzienne i roczne na energię wentylatora w pierwszej stacji po optymalizacji sieci wyniosło:

$$E_{w1d} = \frac{24 \cdot 3033}{1000 \cdot 0,52} = 140,0 \text{ kWh}$$

$$E_{w1r} = \frac{24 \cdot 365 \cdot 3033}{1000 \cdot 0,52} = 51094 \text{ kWh} = 51,094 \text{ MWh}$$

Zapotrzebowanie dzienne i roczne na energię wentylatora w drugiej stacji po optymalizacji sieci wyniosło:

$$E_{w1d} = \frac{24 \cdot 4763}{1000 \cdot 0,59} = 193,7 \text{ kWh}$$

$$E_{w1r} = \frac{24 \cdot 365 \cdot 4763}{1000 \cdot 0,59} = 70718 \text{ kWh} = 70,718 \text{ MWh}$$

Łącznie zapotrzebowanie roczne na energię elektryczną przez stacje wentylatorów wynosi 121,812 MWh.

Roczny zysk energetyczny po optymalizacji sieci wentylacyjnej wyniósł:

$$157,615 - 121,812 = 35,803 \text{ MWh}$$

Zysk energetyczny 35,803 MWh przekłada się na 22,7% obniżonych kosztów związanych z pracą wentylatorów w Sztolni.

Ponadto przez wykonane prace w Sztolni zminimalizowano i poddano elektronicznej kontroli stężenia dwutlenku węgla (czujniki CO₂ połączone z dyspozytornią), aby mieściły się w bezpiecznych granicach. Uzyskano to przez regulację powietrza w świetliku doprowadzającym powietrze na poziomie III.

W okresie zimowym dodatkowo wykorzystywana będzie instalacja związana z rekuperacją powietrza. Ograniczenie napływu świeżego, zimnego powietrza do budynku naziemnego Muzeum (budynek z kasami) oraz częściowa rekuperacja, uzyskana przez połączenie otworu wylotowego W(2015) ze świetlikami dachowymi, w znacznym stopniu obniży koszty związane z ogrzewaniem powietrza w całym obiekcie. Przeprowadzenie prac w tamach TB-1 i TB-3 pozwoliło na wprowadzenie ogrzanego powietrza z budynku Muzeum do Sztolni, a nie wyprowadzanie go na zewnątrz. Ponadto regulacja powietrza w świetliku, dostarczającym powietrze na poziom III, pozwoliła na jego minimalizację i kontrolę oraz utrzymanie bezpiecznych stężeń dwutlenku węgla. Zmniejszenie ilości powietrza przepływającego przez stację ładowania akumulatorów pozwoliło na skierowanie powietrza w pozostałe rejony Sztolni. Średni wzrost temperatury w całym obiekcie wahał się od 3°C do 10°C (tabela 14.3).

Tabela 14.3

Wyniki pomiaru temperatury powietrza w wyrobiskach Sztolni bez i z rekuperacją w okresie zimowym

Temperatura zewnętrzna °C	Miejsce pomiaru temperatury powietrza	Temperatura powietrza w wyrobisku bez stosowania rekuperacji °C	Temperatura powietrza w wyrobisku z wykorzystaniem rekuperacji °C
10 (bez pracującej nagrzewnicy powietrza)	1 – Karczma Guibald	14	15
	2 – Ściana kombajnowa N-02	16	18
	3 – Chodnik główny poziom II	12	15
	4 – Ściana strugowa N-03	16	18
5	1 – Karczma Guibald	15	16
	2 – Ściana kombajnowa N-02	17	19
	3 – Chodnik główny poziom II	7	14
	4 – Ściana strugowa N-03	9	15
0	1 – Karczma Guibald	11	14
	2 – Ściana kombajnowa N-02	13	15
	3 – Chodnik główny poziom II	2	10
	4 – Ściana strugowa N-03	5	11
-5	1 – Karczma Guibald	7	11
	2 – Ściana kombajnowa N-02	9	12
	3 – Chodnik główny poziom II	-3	4
	4 – Ściana strugowa N-03	2	9
-10	1 – Karczma Guibald	3	7
	2 – Ściana kombajnowa N-02	5	8
	3 – Chodnik główny poziom II	-7	0
	4 – Ściana strugowa N-03	-2	5

14.4. Podsumowanie

Dotychczas przeprowadzone prace pozwoliły w znaczący sposób obniżyć koszty związane z systemem wentylacji w Sztolni Królowa Luiza. Nakłady związane z optymalizacją sieci wentylacyjnej (zakup falownika, modernizacja wlotów i wylotów ze Sztolni – budowa zasuw, regulatorów) wyniosły około 20.000 PLN. Roczny zysk

energetyczny wyniósł około 38 MWh. Koszt 1 MWh w 2022 roku wynosił 400 zł/MWh, co daje oszczędności na poziomie 15.200 PLN. Zwrot poniesionych nakładów związanych z optymalizacją sieci powinien nastąpić po około 16 miesiącach. Dalsze prace nad bezpieczeństwem sieci wentylacyjnej i redukcją kosztów oraz zapewnieniem właściwych warunków klimatycznych wymagały poniesienia dodatkowych nakładów. Związane są one między innymi z zabudową falownika przy drugim wentylatorze, co umożliwi płynną i bezpieczną regulację jego parametrów pracy. Obecnie regulacja drugiego wentylatora odbywa się za pomocą zasuw. Takie rozwiązanie pozwala na zapewnienie właściwych warunków przewietrzania, lecz jest bardzo nieekonomiczne. Zwiększanie oporów przepływu powietrza na zasuwie wentylatora powoduje zmniejszenie jego wydajności, lecz znacznie podnosi spiętrzenie, co nie zawsze przekłada się na korzyści energetyczne. Przed montażem falownika w drugiej stacji wentylatorów konieczne będzie wykonanie pełnych charakterystyk pracy tych wentylatorów, a następnie sprawdzenie poprawności ich działania z falownikami.

Należy jednak mieć na uwadze fakt, iż zmniejszenie ilości powietrza przepływającego przez wyrobiska Sztolni w niektórych przypadkach może powodować wystąpienie niebezpiecznych gazów – głównie dwutlenku węgla. Jest to związane z tym, iż wyrobiska Sztolni są położone w sąsiedztwie starych zrobów (była kopalnia „Luiza”). W celu zapewnienia właściwych warunków gazowych (minimalnego stężenia tlenu oraz niedopuszczenie do przekroczenia stężeń dopuszczalnych dwutlenku węgla), konieczne jest zabudowanie dodatkowych elementów automatyki, dzięki którym możliwa będzie regulacja ilości dopływającego świeżego powietrza, głównie na poziom III (dotyczy to przede wszystkim zniżek barycznych). Obecnie tylko nieliczne czujniki są połączone bezpośrednio ze stacją dyspozytorską, a wyłącznie pełna automatyka wyeliminuje konieczność ciągłego sprawdzania wartości stężeń gazów przez służby wentylacyjne Sztolni.

Przeprowadzone prace związane z rekuperacją pozwoliły na znaczne obniżenie kosztów związanych z systemem wentylacji i ogrzewania w Sztolni. Nakłady związane z zakupem lutniociągów i ich zabudową wyniosły 100.000 PLN. Zysk energetyczny związany z rekuperacją zależy przede wszystkim od temperatury powietrza panującej na powierzchni. Zakładając, że konieczność ogrzewania powietrza następowała w okresie listopad – marzec (około 150 dni) oraz ogrzewane było powietrze w ilości 8,66 m³/s (520 m³/min), gdzie uzyskano wzrost temperatury powietrza o 5°C, to zysk energetyczny za ten okres wyniósł 168,350 MWh. Uwzględniając koszt 1 MWh na poziomie 400 PLN, daje to zysk w kwocie

67.340 PLN. Zwrot nakładów związanych z rekuperacją powinien nastąpić już w drugim okresie zimowym.

Podziękowania

Źródło finansowania: Wydział Górnictwa, Inżynierii Bezpieczeństwa i Automatyki Przemysłowej, Politechnika Śląska w Gliwicach – praca 06/050/BK-50/0098 oraz Muzeum Górnictwa Węglowego w Zabrze.

Bibliografia

1. Hörz P., Richter M.: Preserved as technical monuments, run as tourist attractions: Narrow-gauge railways in the German Democratic Republic. *The Journal of Transport History*, 2011, 32.2, 192–213.
2. Bujok P., et al.: Industrial tourism in the context of the industrial heritage. *Geojournal of Tourism and Geosites*, 2015, 15.1, 81–92.
3. Rybár P., Štrba L.: Mining tourism and its position in relation to other forms of tourism. *Proceedings of the Geotour*, 2016, 7–12.
4. Lamparska M. et al.: Post-mining tourism in Upper Silesia and Czech-Moravian country. *Journal of Geography, Politics and Society*, 2019, 9.2, 57–68.
5. Kimic K., Amaniotta Costa C., Negulescu M.: Creating tourism destinations of underground built heritage – The cases of salt mines in Poland, Portugal, and Romania. *Sustainability*, 2021, 13.17, 9676.
6. Oktay Vehbi B., et al.: The tourism potential of post-mining heritage sites: The Cyprus mining cooperation in Lefka, Cyprus. *Geoheritage*, 2022, 14.2, 58.
7. Koudelková J., et al.: Geomontaneous Tourism and the Possibilities of Utilizing Abandoned Mine Workings in the Czech Republic. *Geoheritage* 14, 29 (2022). <https://doi.org/10.1007/s12371-022-00670-3>
8. Internetowy System Aktów Prawnych (ISAP). Ustawa z dnia 9 czerwca 2011 r. Prawo geologiczne i górnicze (Dz. U. 2023, poz. 633). Pobrane z: <https://isap.sejm.gov.pl/isap.nsf/download.xsp/WDU20111630981/U/D20110981Lj.pdf> (dostęp 15.05.2023).
9. Internetowy System Aktów Prawnych (ISAP). Ustawa z dnia 3 lutego 1995 r. o ochronie gruntów leśnych i rolnych (Dz. U. 2022, poz. 2409). Pobrane z: <https://isap.sejm.gov.pl/isap.nsf/download.xsp/WDU19950160078/U/D19950078Lj.pdf> (dostęp 15.05.2023).
10. <https://kopalniaguido.pl/> (dostęp 15.05.2023).
11. <https://sztolnialuiza.pl/index.php/pl/> (dostęp 15.05.2023).
12. Musioł D.: Assessment of the Costs of Preventive Works Concerning Fire Hazard on the Example of Selected Longwalls of Two Mining Companies. *Safety & Fire Technology*, 2022, 59.

13. Shriwas M., Pritchard Ch.: Ventilation monitoring and control in mines. *Mining, Metallurgy & Exploration*, 2020, 37.4, 1015–1021.
14. Gyamfi S., Halim A., Martikainen A.: Development of strategies to reduce ventilation and heating costs in a Swedish sublevel caving mine – a unique case of LKAB's konsult mine. *Mining, Metallurgy & Exploration*, 2021, 1–18.
15. DE VILHENA COSTA, Leandro; MARGARIDA DA SILVA, José. Cost-saving electrical energy consumption in underground ventilation by the use of ventilation on demand. *Mining technology*, 2020, 129.1, 1–8.
16. Nel A., et al.: Achieving energy efficiency with medium voltage variable speed drives for ventilation-on-demand in South African mines. *Journal of Cleaner Production*, 2019, 232, 379–390.
17. Internetowy System Aktów Prawnych (ISAP). Rozporządzenie Ministra Energii z dnia 23 listopada 2016 r. w sprawie szczegółowych wymagań dotyczących prowadzenia ruchu podziemnych zakładów górniczych (Dz. U. 2019, poz. 1880). Pobrane z: <https://isap.sejm.gov.pl/isap.nsf/download.xsp/WDU20190001880/O/D20191880.pdf> (dostęp 15.05.2023).
18. Mocek P.: Dobór wentylatorów głównych dla modelu docelowego kopalni x na podstawie analizy i obliczeń sieci wentylacyjnej. *Systemy Wspomagania w Inżynierii Produkcji. Energia i Górnictwo – perspektywy zrównoważonego rozwoju*, 2020, 9 (2), 71–85.
19. Musioł D.: Optymalizacja ilości powietrza w restrukturyzowanych kopalniach węgla kamiennego. Praca doktorska. Politechnika Śląska 2001.
20. Słota K., Słota Z.: *Aerologia z zastosowaniem technik komputerowych*. Politechnika Śląska, Gliwice 2007.
21. Słota K., Słota Z.: Edukacyjne i naukowe aspekty pakietu Z.K.S. Multiklimat 2000 w rozwiązywaniu zagadnień z zakresu wentylacji i klimatyzacji kopalń. *Polski Kongres Górniczy. Gospodarka Surowcami Mineralnymi* 2007, 23/4, 297–310.

15. FREE-COOLING JAKO SPOSÓB NA PODNIESIENIE EFEKTYWNOŚCI ENERGETYCZNEJ KLIMATYZACJI W GÓRNICTWIE PODZIEMNYM

15.1. Wprowadzenie

Rosnące koszty energii, a co za tym idzie coraz wyższe nakłady na klimatyzację w kopalniach podziemnych skłaniają do szukania różnych dróg oszczędności. Free-cooling [1–5] jako rozwiązanie niepociągające za sobą bardzo wysokich kosztów instalacji może okazać się drogą do uzyskania znacznych oszczędności energii i podniesienia efektywności energetycznej całego systemu klimatyzacji. W polskich warunkach klimatycznych jest to rozwiązanie bardzo pożądane. Przyszłość wentylacji i klimatyzacji głębokich kopalń podziemnych może wykazać słuszność stosowania tego typu rozwiązań, a badania przeprowadzane w tym temacie już dzisiaj pozwalają na bardziej optymalne zastosowanie tych rozwiązań.

W warunkach kopalń podziemnych (zarówno tych polskich, europejskich, jak i światowych) znaczącą ilość energii elektrycznej pochłaniają wentylacja i klimatyzacja [6–8]. Stosowane obecnie systemy klimatyzacji, w celu zapewnienia odpowiednich warunków klimatycznych, zużywają energię przez cały cykl swojej pracy. W tych warunkach opcja free-coolingu w systemach klimatyzacyjnych staje się sposobem na zmniejszanie zużycia energii podczas tworzenia warunków komfortu cieplnego w kopalni [6–8]. Systemy takie sprawdzają się doskonale w sezonie zimowym oraz dobrze w przejściowych. W warunkach klimatycznych Polski ich efektywne działanie może teoretycznie objąć nawet 5–6 miesięcy w roku.

15.2. Idea free-coolingu

Free-cooling to proces wykorzystania darmowych pokładów chłodu zawartych w powietrzu zewnętrznym o niskiej temperaturze do schłodzenia powietrza wewnątrz obiektu [3]. W praktyce wykorzystanie naturalnego chłodzenia powietrza może

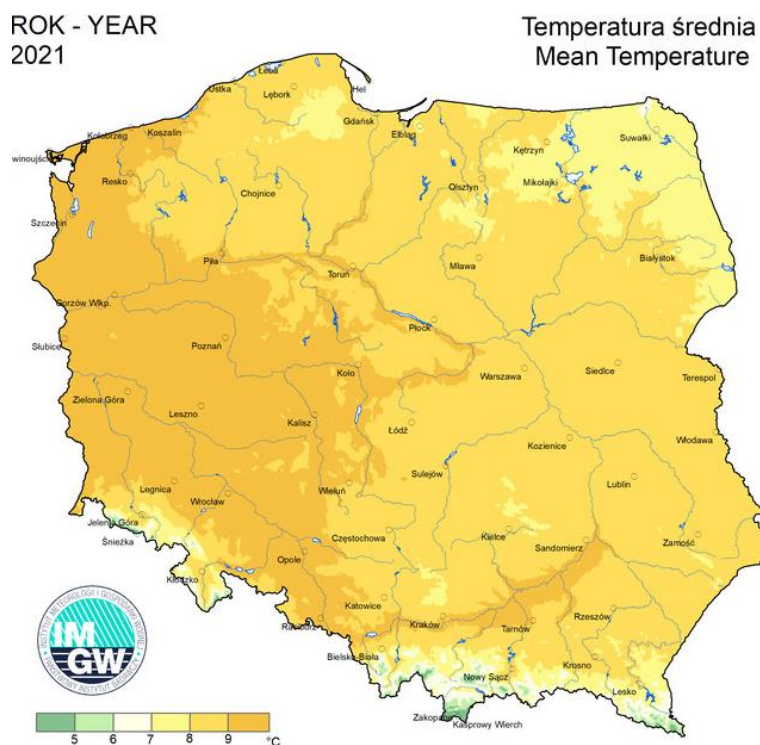
odbywać się w sposób pośredni i bezpośredni [9, 10]. Jeżeli rozpatruje się proces free-cooling w centrali klimatyzacyjnej, który polega na zwiększeniu udziału świeżego powietrza zewnętrznego do chłodzenia pomieszczenia w okresie występowania niskich temperatur powietrza atmosferycznego, to taki proces możemy nazwać free-coolingiem bezpośrednim. Jeżeli proces schładzania powietrza odbywa się z wykorzystaniem wody ziębniczej, schłodzonej w agregacie wody ziębniczej, za pośrednictwem funkcji free-cooling agregatu, to taki proces, patrząc pod kątem centrali, realizowany jest w sposób pośredni. Woda ziębnicza jest cieczą pośredniczącą pomiędzy powietrzem zewnętrznym a schładzaniem powietrzem wewnętrznym. Obydwa powyższe przypadki dotyczą wykorzystania funkcji free-cooling, w której odbiornikiem chłodu jest powietrze wewnętrzne.

Z kolei przy wykorzystaniu funkcji free-cooling w sprężarkowych agregatach chłodniczych do chłodzenia wody ziębniczej [1] istnieje podobna nomenklatura, z tym że odbiornikiem chłodu zawartego w powietrzu zewnętrznym jest woda ziębnicza. Jeżeli woda ziębnicza bezpośrednio odbiera chłód od powietrza zewnętrznego, to w takim przypadku mamy do czynienia z free-coolingiem bezpośrednim (tzw. Direct Free-Cooling – FCD). Do typowych rozwiązań realizujących ten proces free-cooling należą tradycyjne rozwiązania w agregatach chłodniczych, wykorzystujące dodatkowy wymiennik wodny montowany przed skraplaczem oraz trójdrogowy zawór regulacyjny. Mimo niskiej efektywności najprostszym i najczęściej stosowanym układem free-cooling w klimatyzacji centralnej polskich kopalń jest system pośredni z odrębnym obiegiem wodnego roztworu glikolu. Oszczędność wynikająca ze swobodnego chłodzenia uzyskuje się głównie dzięki dwu- lub trzystopniowemu schładzaniu wody lodowej. Woda schładzana przepływa przez dwa lub trzy parowniki połączone szeregowo. Pierwszy lub pierwszy i drugi stopnie mogą zostać wyłączone dzięki wykorzystaniu swobodnego chłodzenia, w zależności od temperatury wody na jego wyjściu i temperatury powietrza.

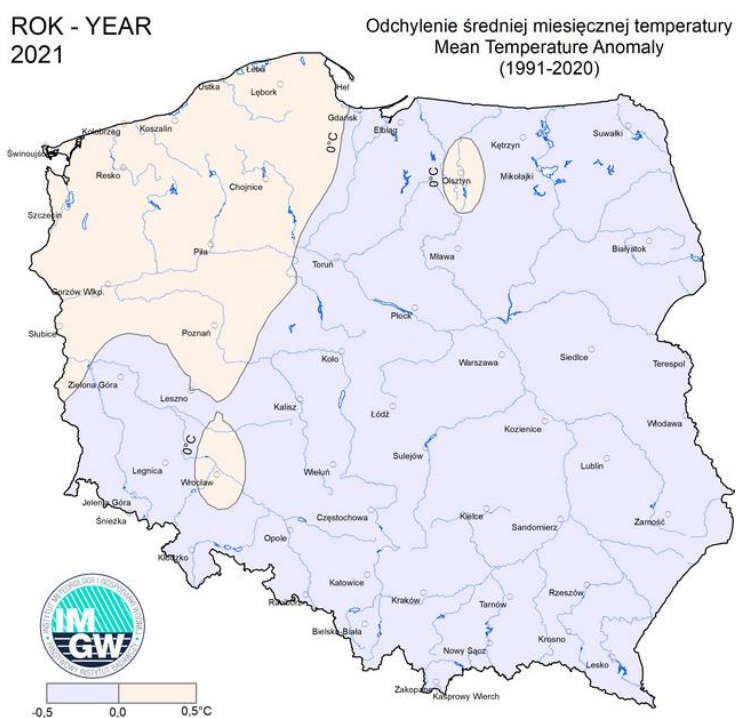
15.3. Analiza możliwości i sposobów realizacji free-cooling

Teoretyczne możliwości zastosowania free-cooling zachodzą już w momencie, gdy temperatura wody, która powraca po wykorzystaniu jej w podziemiach kopalni jest wyższa od temperatury powietrza na powierzchni. Jest to niestety tylko teoria, gdyż specyfika kopalnianych układów klimatyzacji weryfikuje te założenia. Należy pamiętać, że przy projektowaniu instalacji kopalnianych zakłada się, że temperatura

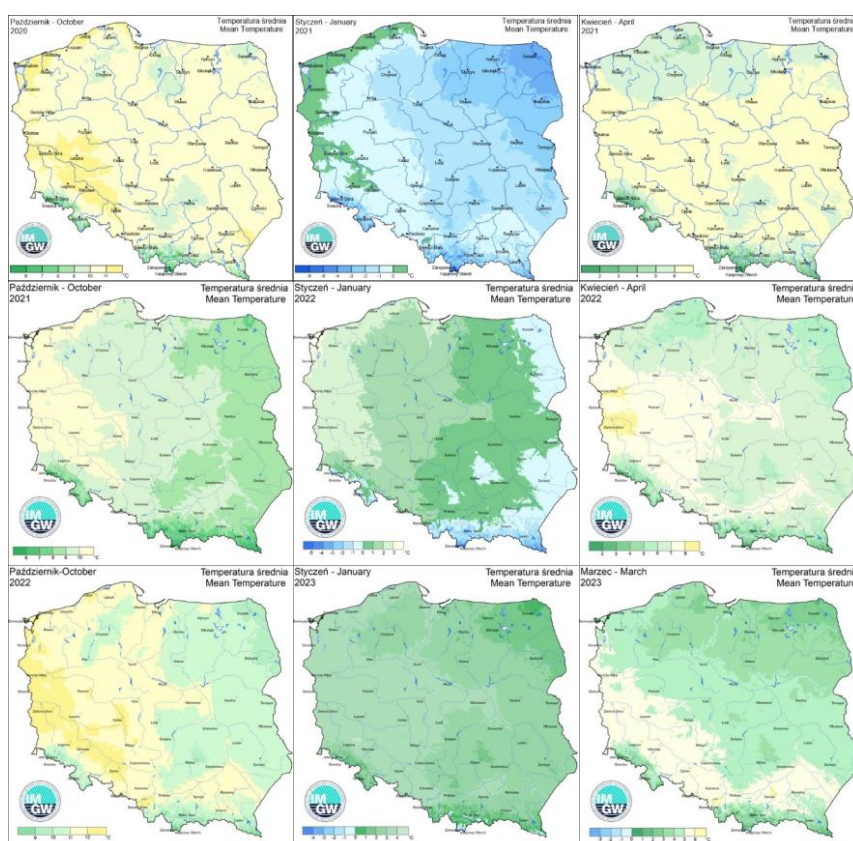
wody lodowej będzie wynosić ok. 2°C [6–8]. Stąd też temperatura na powierzchni, dla efektywnego działania takiej instalacji, powinna być znacznie niższa od temperatury wody powracającej. Oczywiście sytuacją idealną byłaby możliwość wyprodukowania całej wody lodowej tylko za pomocą powietrza, co pozwoliłoby na zatrzymanie agregatów chłodniczych i znaczną oszczędność energii elektrycznej. Wydaje się jednak, że w warunkach klimatycznych Polski południowej taka sytuacja możliwa jest tylko w ciągu 2–3 miesięcy w roku. W państwach północnej Europy czas efektywności free-coolingu będzie dłuższy niż dla Europy Środkowej. Nie oznacza to jednak, że w warunkach klimatycznych Polski opłacalność takiej instalacji będzie znacząco mniejsza. Na rysunkach 15.1–15.5 przedstawiono dane obrazujące w sposób graficzny średnią temperaturę za cały 2021 rok (brak danych za 2022 rok) oraz jej odchylenie w stosunku do lat 1991–2020, średnie temperatury października, stycznia i kwietnia (marca 2023) dla Polski za trzy ostatnie lata, a także temperaturę średnią dla zimy 2022/23 roku i zim w latach 1991–2020. Mimo globalnego ocieplenia odchylenia średniej miesięcznej temperatury za ostatnie 20–30 lat nie przekraczają 1°C. W naszych warunkach geograficznych zimy są nadal dosyć mroźne, a właśnie w okresach zimowym i wiosennym stosowanie free-coolingu w Polsce ma największy sens i uzasadnienie ekonomiczne.



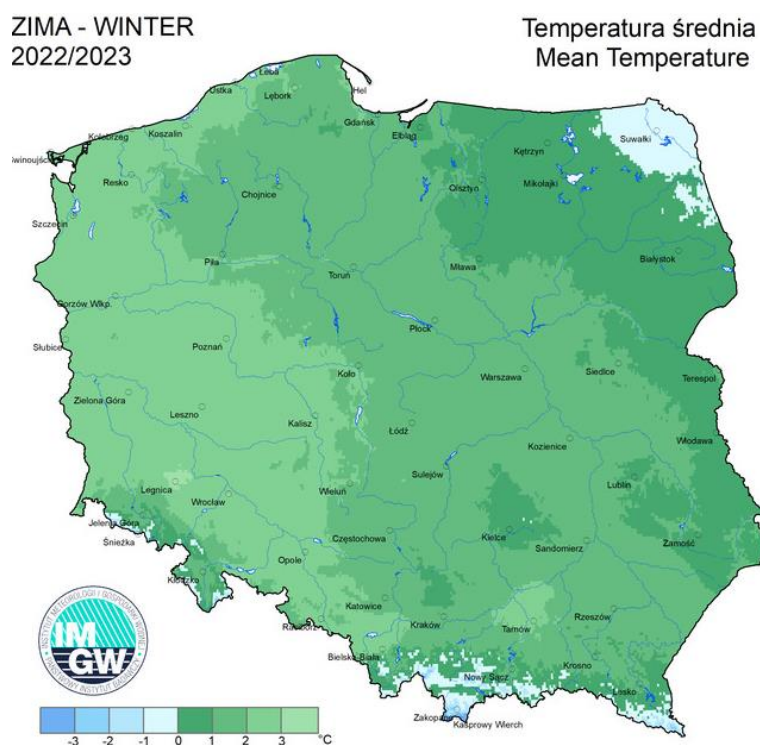
Rys. 15.1. Temperatura średnia w 2021 roku [źródło: <https://klimat.imgw.pl>]
Fig. 15.1. Average temperature in 2021 [source: <https://klimat.imgw.pl>]



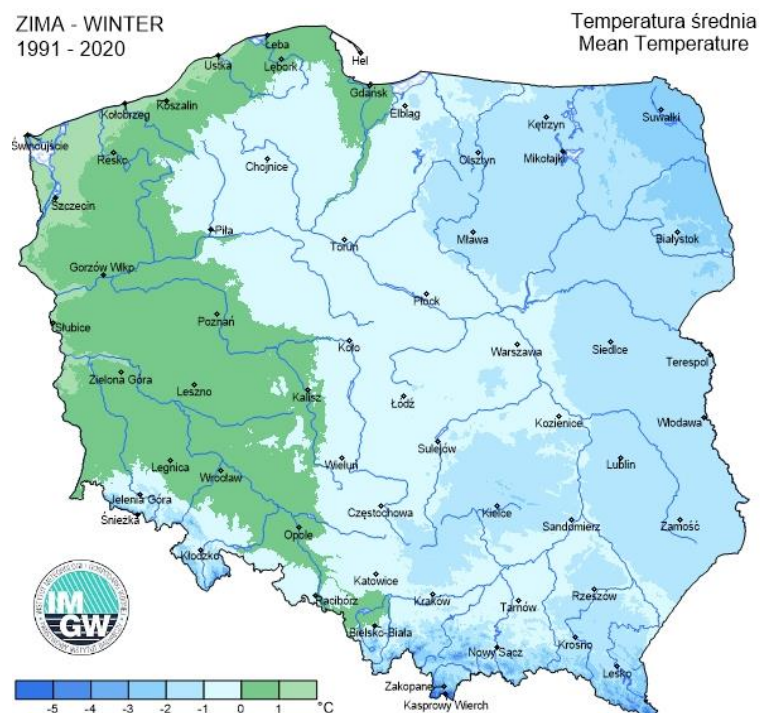
Rys. 15.2. Odchylenia średniej miesięcznej temperatury za lata 1991–2020 [źródło: klimat.imgw.pl]
Fig. 15.2. Deviation of monthly average temperature for 1991–2020 [source: klimat.imgw.pl]



Rys. 15.3. Średnie temperatury października, stycznia i kwietnia (marca 2023) za trzy ostatnie lata [źródło: klimat.imgw.pl]
Fig. 15.3. Average temperatures of October, January and April (March 2023) for the last three years [source: klimat.imgw.pl]



Rys. 15.4. Temperatura średnia zimy 2022/23 [źródło: <https://klimat.imgw.pl>]
Fig. 15.4. Average winter temperature 2022/23 [source: <https://klimat.imgw.pl>]



Rys. 15.5. Temperatura średnia zim 1991–2020 [źródło: <https://klimat.imgw.pl>]
Fig. 15.5. Average temperature of winters 1991–2020 [source: <https://klimat.imgw.pl>]

Należy jednak pamiętać, że w przypadku instalacji kopalnianych każdy projekt powinien być poprzedzony dokładną analizą warunków klimatycznych dla danego

rejonu. Łatwo można przeszacować spodziewane korzyści z projektowanego rozwiązania. Także jednoroczne anomalie pogodowe (np. bardzo ciepła zima) nie powinny mieć wpływu na planowanie inwestycji. W takim przypadku należy oprzeć się na danych globalnych (np. za ostatnie 20–30 lat) i ewentualnie uwzględnić obecne trendy (np. globalny wzrost temperatury).

15.4. Układ free-coolingu w klimatyzacji centralnej kopalń

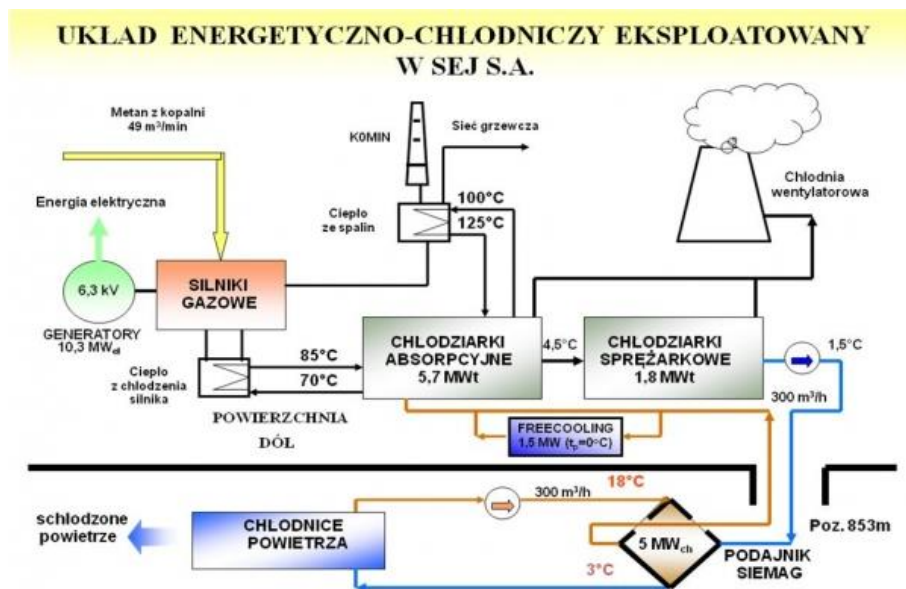
Jak już wspomniano, mimo niskiej efektywności najprostszym i najczęściej stosowanym układem free-coolingu w klimatyzacji centralnej polskich kopalń jest system pośredni z odrębnym obiegiem wodnego roztworu glikolu. Taki system free-coolingu został wprowadzony we wszystkich układach klimatyzacji centralnej w polskich kopalniach. W pracach naukowców z AGH [7] zostały pokazane przykłady wykorzystania free-coolingu w klimatyzacji kopalń podziemnych (instalacja chłodnicza klimatyzacji centralnej w KWK „Pniówek”, KWK „Budryk” (rys. 15.6) [7], ZG „Rudna” (15.7) [6] oraz projekt instalacji chłodniczej klimatyzacji centralnej w DUL CSM w Stonavie). Poniżej przedstawiono tylko przykładowe schematy takiego rozwiązania. W układzie klimatyzacji centralnej KWK „Pniówek” instalacja free-coolingu jest uruchamiana od temperatury $+8^{\circ}\text{C}$ i osiąga moc chłodniczą ok. 2,6 MW przy temperaturze powietrza $-3,5^{\circ}\text{C}$ (rys. 15.8). Instalacja ta w okresie sprzyjających temperatur zewnętrznych może zastąpić jeden z etapów chłodniczych, umożliwiając zwiększenie ilości dostarczanego ciepła do systemu grzewczego ciepłowni „Pniówek”. Cały proces sterowany jest komputerowo, dając możliwość bieżącego monitoringu pracy układu (rys. 15.9).

W systemie klimatyzacji centralnej w kopalni Rudna ciepła woda o temperaturze około 22°C z dołu kopalni podawana jest, w zależności od temperatury powietrza atmosferycznego, na:

- bloki chłodnicze maszynowe, z których każdy składa się z kolejno z: absorpcyjnego urządzenia chłodniczego oraz amoniakalnego agregatu sprężarkowego,
- układ free-coolingu, składający się z czterech, równolegle zasilanych chłodnic wody, wersji natryskowo-wyparnej, typu VXI 430-3/XB Baltimore.

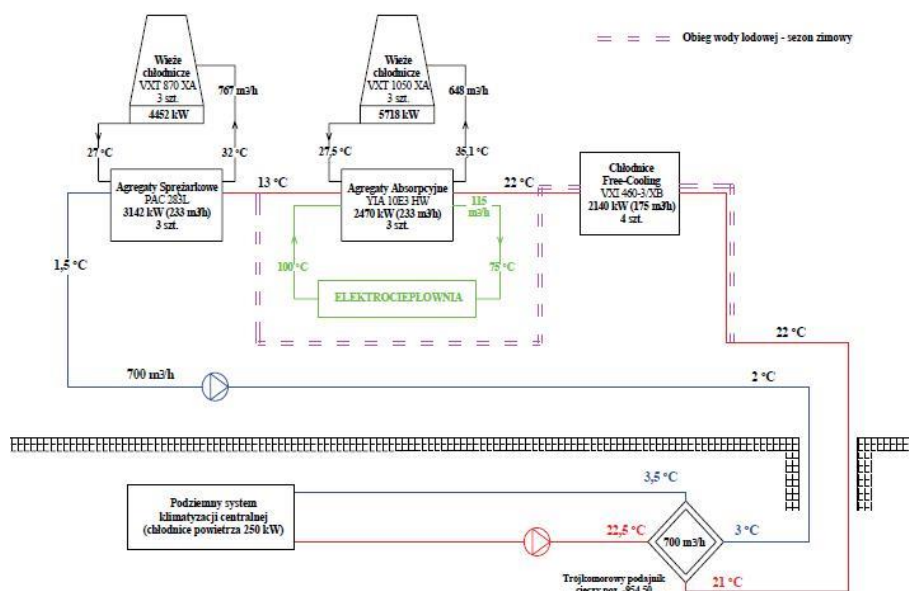
Zgodnie z parametrami nominalnymi wieże free-cooling powinny pracować przy temperaturze powietrza atmosferycznego poniżej 15°C . W przypadku gdy warunki

atmosferyczne umożliwią uzyskanie na wylocie z chłodnic free-cooling wartości temperatury wody około 13°C, co nastąpi przy temperaturze zewnętrznej około 4°C, agregaty absorpcyjne zostają wyłączone. Schłodzona w sposób naturalny woda z wieży Baltimore płynie do parowników agregatów sprężarkowych, gdzie podlega dalszemu schładzaniu.



Rys. 15.6. Układ energetyczno-chłodniczy eksploatowany w SEJ S.A. [źródło: www.sejsa.pl], obecnie PGNiG TERMIKA Energetyka Przemysłowa S.A.

Fig. 15.6. Power and cooling system operated at SEJ S.A. [source: www.sejsa.pl], now PGNiG TERMIKA Energetyka Przemysłowa S.A.



Rys. 15.7. Schemat klimatyzacji centralnej w kopalni „Rudna” [6]

Fig. 15.7. Diagram of central air-conditioning in the Rudna mine [6]



Rys. 15.8. Instalacja free-cooling w KWK „Pniówek” [zdjęcia autorskie]
 Fig. 15.8. Free-cooling installation at KWK "Pniówek" [author's photos]



Rys. 15.9. Instalacja free-cooling w KWK „Pniówek” – monitoring wizyjny [zdjęcia autorskie]
 Fig. 15.9. Free-cooling installation at KWK “Pniówek” – video monitoring [author's photos]

15.5. Analiza podniesienia efektywności energetycznej przy wykorzystaniu free-cooling

Dotychczasowe badania i analizy efektywności związane z free-coolingiem opierały się głównie na klimatyzacji stosowanej „na powierzchni”, czyli w systemach klimatyzacji zakładów produkcyjnych, hal sportowych itp. Urządzenia te w systemach klimatyzacyjnych polskich kopalń są stosowane już od ok. 15 lat, jednak trudno jest dotrzeć do dogłębnych analiz na temat efektywności free-cooling w polskim górnictwie. KWK „Pniówek” ma taką instalację od 2007 roku, a uzyskane przez autorów opinie od kierownictwa Kopalni są bardzo pozytywne. W pracach autorów z AGH znajduje się stwierdzenie, że analiza istniejących i projektowanych układów klimatyzacji centralnej ze swobodnym chłodzeniem wykazuje, że średnioroczna oszczędność wynikająca ze stosowania free-cooling może wynosić od 8% do 20% kosztów eksploatacji klimatyzacji centralnej. Badania i analizy prowadzone przez

autorów niniejszej pracy w dużej mierze potwierdzają te informacje. Przy sprzyjających warunkach atmosferycznych spodziewane oszczędności mogą sięgnąć nawet dwudziestu kilku procent kosztów eksploatacji klimatyzacji centralnej.

Niestety mogą się również zdarzyć sezony, gdzie oszczędności nie przekroczą kilku procent. Duża rozpiętość osiągniętych oszczędności wynika między innymi z faktu zmienności temperatury średniomiesięcznej w ostatnich kilku latach dla okresu zima-wiosna. Dlatego też bardzo ważne jest, aby w trakcie projektowania instalacji klimatyzacyjnych oprzeć się na analizie zagadnień dotyczących zużycia energii i związanych z tym kosztów eksploatacji. Polska południowa jest stosunkowo dobrze zaopatrzona w stacje pomiarowe warunków meteorologicznych. Instytut Meteorologii i Gospodarki Wodnej dysponuje także danymi archiwalnymi z kilkudziesięciu lat wstecz. Projektując instalację free-coolingu powinno się dysponować takimi danymi dla rejonu, gdzie będzie ona działać. Pozwoli to na dokonanie prognozy efektywności projektu oraz pomoże w doborze odpowiedniego systemu.

Poniżej (tabele 15.1–15.10) przedstawiono wykonane obliczenia, związane z rzeczywistą, nowo projektowaną instalacją klimatyzacji centralnej kopalni węgla, przy uwzględnieniu zastosowania systemu free-coolingu oraz bez jego stosowania.

Tabela 15.1

Harmonogram eksploatacji oraz zapotrzebowanie na moc chłodniczą na 2023 rok

Partia	Ściana	Eksploatacja – 2023											
		I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
A	A1P5												
F	F1P7												
D	D1P8												
Moce chłodnicze, kW													
Roboty przygotowawcze		1500	1500	1500	1500	2100	2100	2400	2400	2100	2500	3000	2800
Ściany		350	700	700	700	700	750	750	750	750	750	750	400
Straty		180	220	220	220	280	280	320	320	280	320	380	320
Suma		2030	2420	2420	2420	3080	3130	3470	3470	3130	3570	4130	3520
Free-cooling													
Moc odebrana, kW		650	750	650	50	0	0	0	0	50	850	1400	1200
Zysk miesięczny, %		32,0	31,0	26,9	2,07	0	0	0	0	1,6	23,8	33,9	34,1
Zysk roczny, kW (%)		5600 (15,2)											

Tabela 15.2

Harmonogram eksploatacji oraz zapotrzebowanie na moc chłodniczą na 2024 rok

Partia	Ściana	Eksploatacja – 2024											
		I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
B	B1P5												
D	D2P8												
A	A1P6												
F	F2P7												
C	C1P8												
D	D3P8												
A	A2P6												
Moce chłodnicze, kW													
Roboty przygotowawcze		2800	2700	2200	2200	2200	2100	2100	2000	2000	2100	2100	2100
Ściany		750	750	750	750	1050	1050	1350	1350	1050	1400	2250	1850
Straty		350	340	300	300	330	320	340	330	300	350	430	400
Suma		3900	3790	3250	3250	3580	3470	3790	3680	3350	3850	4780	4350
Free-cooling													
Moc odebrana, kW		1000	900	750	50	0	0	0	0	100	950	1550	1400
Zysk miesięczny, %		25,6	23,7	23,1	1,54	0	0	0	0	2,99	24,7	32,4	32,2
Zysk roczny, kW (%)		6700 (14,9)											

Tabela 15.3

Harmonogram eksploatacji oraz zapotrzebowanie na moc chłodniczą na 2025 rok

Partia	Ściana	Eksploatacja – 2025											
		I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
B	B2P5												
E	E1P8												
D	D1P9												
Moce chłodnicze, kW													
Roboty przygotowawcze		2600	2600	2200	2100	2000	2000	2000	2600	2000	2000	2000	2000
Ściany		1850	1850	1150	1150	1150	1100	1100	1050	1050	1100	1100	1100
Straty		440	440	330	330	320	310	310	360	450	460	460	460
Suma		4890	4890	3680	3580	3470	3410	3410	4010	3500	3560	3560	3560
Free-cooling													
Moc odebrana, kW		1100	950	650	50	0	0	0	0	50	800	1400	1500
Zysk miesięczny, %		22,5	19,4	17,7	1,4	0	0	0	0	1,43	22,5	39,3	42,1
Zysk roczny, kW (%)		6500 (14,3)											

Tabela 15.4

Harmonogram eksploatacji oraz zapotrzebowanie na moc chłodniczą na 2026 rok

Partia	Ściana	Eksploatacja – 2026											
		I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
B	B2P5												
E	E1P8												
D	D1P9												
C	C2P8												
G	G1P5												
F	F3P7												
D	F4P8												
B	B1P6												
Moce chłodnicze, kW													
Roboty przygotowawcze		1800	2000	2000	2000	2100	2100	2500	2000	2000	2000	2000	2000
Ściany		1500	1500	1150	1150	1100	1100	1100	1500	1100	1100	1100	1100
Straty		490	520	470	470	480	480	540	520	460	460	460	460
Suma		3790	4020	3620	3620	3680	3680	4140	4020	3560	3560	3560	3560
Free-cooling													
Moc odebrana, kW		1100	850	650	50	0	0	0	0	50	800	1400	1500
Zysk miesięczny, %		29,0	21,1	18,0	1,38	0	0	0	0	1,4	22,5	39,3	42,1
Zysk roczny, kW (%)		6400 (14,3)											

Tabela 15.5

Harmonogram eksploatacji oraz zapotrzebowanie na moc chłodniczą na 2027 rok

Partia	Ściana	Eksploatacja – 2027											
		I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
B	B1P6												
C	C3P8												
D	D2P9												
F	F4P7												
A	A1P8												
G	G2P5												
Moce chłodnicze, kW													
Roboty przygotowawcze		2600	2600	2300	2000	2200	2500	2500	2500	2100	2100	2000	2000
Ściany		750	1150	1150	1150	1150	1100	1450	1100	1100	1100	1100	1450
Straty		500	560	520	470	500	540	590	540	480	480	460	520
Suma		3850	4310	3970	3620	3850	4140	4540	4140	3680	3680	3560	3970
Free-cooling													
Moc odebrana, kW		1150	900	650	50	0	0	0	0	50	750	1400	1600
Zysk miesięczny, %		29,9	20,9	16,4	1,38	0	0	0	0	1,36	20,4	39,3	40,3
Zysk roczny, kW (%)		6550 (13,8)											

Tabela 15.6

Harmonogram eksploatacji oraz zapotrzebowanie na moc chłodniczą na 2028 rok

Partia	Ściana	Eksploatacja – 2028											
		I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
D	D2P9												
F	F4P7												
A	A1P8												
G	G2P5												
B	B2P6												
E	E2P8												
D	D1P10												
A	A2P8												
F	F5P7												
Moce chłodnicze, kW													
Roboty przygotowawcze		2400	2600	2500	2400	2100	2100	2400	2400	2000	2000	2000	2000
Ściany		1800	1450	1050	1100	1500	1500	1500	1150	1150	1150	1150	1500
Straty		630	610	530	520	540	540	580	530	470	470	470	520
Suma		4830	4660	4080	4020	4140	4140	4480	4080	3620	3620	3620	4020
Free-cooling													
Moc odebrana, kW		1400	1100	650	50	0	0	0	0	50	750	1350	1600
Zysk miesięczny, %		29	23,6	15,9	1,24	0	0	0	0	1,38	20,7	37,3	39,8
Zysk roczny, kW (%)		6950 (14,1)											

Tabela 15.7

Harmonogram eksploatacji oraz zapotrzebowanie na moc chłodniczą na 2029 rok

Partia	Ściana	Eksploatacja – 2029											
		I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
E	E2P8												
D	D1P10												
A	A2P8												
F	F5P7												
C	C4P8												
A	A3P6												
D	D3P9												
B	B1P8												
Moce chłodnicze, kW													
Roboty przygotowawcze		2200	2400	2600	2600	2600	2500	2500	2200	2000	2000	2000	2000
Ściany		1500	1500	1500	1100	1150	1150	1150	1900	1150	1100	1100	1100
Straty		550	580	610	550	560	540	540	620	470	460	460	460
Suma		4250	4480	4710	4250	4310	4190	4190	4720	3620	3560	3560	3560
Free-cooling													
Moc odebrana, kW		1300	1000	800	50	0	0	0	0	50	750	1350	1600
Zysk miesięczny, %		30,6	22,3	17,0	1,18	0	0	0	0	1,38	21,1	37,9	44,9
Zysk roczny, kW (%)		6900 (14,0)											

Tabela 15.8

Harmonogram eksploatacji oraz zapotrzebowanie na moc chłodniczą na 2030 rok

Partia	Ściana	Eksploatacja – 2030											
		I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
A	A3P6												
D	D3P9												
B	B1P8												
F	F1P8												
A	A3P8												
B	B2P8												
D	D2P10												
Moce chłodnicze, kW													
Roboty przygotowawcze		2100	2100	2100	2000	2100	2200	2300	2400	2400	2000	1500	1500
Ściany		1450	1450	1450	1450	1450	1450	1450	1100	1100	1100	1100	1100
Straty		530	530	530	520	530	540	560	520	520	460	390	390
Suma		4080	4080	4080	3970	4080	4190	4310	4020	4020	3560	2990	2990
Free-cooling													
Moc odebrana, kW		1350	1050	850	50	0	0	0	0	50	700	1200	1500
Zysk miesięczny, %		33,1	25,7	20,8	1,26	0	0	0	0	1,24	19,7	40,1	50,2
Zysk roczny, kW (%)		6750 (14,6)											

Tabela 15.9

Harmonogram eksploatacji oraz zapotrzebowanie na moc chłodniczą na 2031 rok

Partia	Ściana	Eksploatacja – 2031											
		I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
A	A3P8												
B	B2P8												
D	D2P10												
F	F2P8												
G	G1P6												
Moce chłodnicze, kW													
Roboty przygotowawcze		1800	2000	2000	2000	2000	2000	2100	2100	2400	2400	2600	2600
Ściany		1100	1100	1100	1100	1100	1100	1100	1450	1100	1100	1100	700
Straty		430	460	460	460	460	460	480	430	420	520	550	490
Suma		3330	3560	3560	3560	3560	3560	3680	3980	3920	4020	4250	3790
Free-cooling													
Moc odebrana, kW		1350	1000	750	50	0	0	0	0	50	750	1400	1550
Zysk miesięczny, %		40,5	28,1	21,1	1,4	0	0	0	0	1,28	18,7	32,9	40,9
Zysk roczny, kW (%)		6900 (15,4)											

Tabela 15.10

Harmonogram eksploatacji oraz zapotrzebowanie na moc chłodniczą na 2032 rok

Partia	Ściana	Eksploatacja – 2032											
		I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
F	F2P8												
G	G1P6												
C	C1P9												
D	D3P10												
A	A4P8												
B	B1P9												
G	G1P8												
C	C1P10												
Moce chłodnicze, kW													
Roboty przygotowawcze		2400	2400	2100	2000	2000	2000	2100	2000	2100	2100	2100	2100
Ściany		1100	1100	1100	1100	1150	1150	1150	1100	1100	1450	1450	1850
Straty		520	520	480	460	470	470	480	460	480	530	530	590
Suma		4020	4020	3680	3560	3620	3620	3730	3560	3680	4080	4080	4540
Free-cooling													
Moc odebrana, kW		1400	950	750	50	0	0	0	0	50	700	1400	1700
Zysk miesięczny, %		34,8	23,6	20,4	1,4	0	0	0	0	1,36	17,2	34,3	37,4
Zysk roczny, kW (%)		7000 (15,2)											

W ramach prac projektowych i obliczeń wykonano prognozę warunków klimatycznych dla nowo projektowanych frontów robót w kopalni (od 2023 do 2032 roku) oraz określono zapotrzebowanie na moc chłodniczą (tab.15.1–15.10), która pozwoli na zapewnienie odpowiednich, zgodnych z przepisami, warunków klimatycznych na stanowiskach pracy pod ziemią. Następnie wyznaczono koszt energetyczny pracy całej instalacji przy braku i obecności układu free-cooling.

Całkowite zapotrzebowanie na moc chłodniczą w kopalni wyniosło od 36,8 MW (dla 2023 roku) do 49,4 MW (dla 2029 roku). Układ free-cooling w roku odbiera od 5,6 (dla 2023 roku) do 7,0 MW (dla 2032 roku), co daje zysk energetyczny na poziomie 13,8 do 15,4%. Dla takich założeń zwrot z instalacji free-cooling mógłby nastąpić po około 8–10 latach.

15.6. Podsumowanie

Przeprowadzone badania, obliczenia i analizy pokazują rzeczywiste oszczędności i sens stosowania tego typu rozwiązań w polskich warunkach klimatycznych. Wskazują, że jest ekonomicznie uzasadnione adaptowanie opcji free-cooling w dotychczasowych systemach klimatyzacyjnych, w nowo projektowanych systemach czy też w systemach modernizowanych.

Teoretycznie systemy takie sprawdzają się w sezonie zimowym oraz w przejściowych. W warunkach klimatycznych Polski ich efektywne działanie to teoretycznie nawet 5–6 miesięcy. Jednak, w warunkach klimatycznych Polski południowej wyprodukowanie całej wody lodowej tylko za pomocą powietrza (możliwość zatrzymania agregatów chłodniczych) jest realnie możliwe tylko w ciągu 2–3 miesięcy w roku. Mimo sporych oszczędności wynikających ze stosowania free-cooling, z góry można założyć, że przyjmowany niekiedy czas amortyzacji inwestycji na 1-2 sezony, w polskich warunkach, będzie bardzo trudny do osiągnięcia.

Zdaniem autorów potrzebne są dalsze badania i analizy dotyczące efektywności stosowanych dotychczas oraz nowych rozwiązań związanych z free-coolingiem. Dobrym posunięciem mogłoby być powołanie zespołu specjalistów (np. w ramach Priorytetowego Obszaru Badawczego POB 6.8 Efektywność energetyczna i zarządzanie energią), którzy zajęliby się tym problemem. Połączenie doświadczenia naukowców z Politechniki Śląskiej oraz skorzystanie z doświadczenia przedsiębiorstw górniczych powinno zaowocować dogłębną analizą możliwości, sposobów realizacji i efektywności rozwiązań klimatyzacyjnych wspieranych przez free-cooling. Będzie

można wskazać rozwiązania techniczne możliwe do zastosowania w polskim górnictwie podziemnym z uwzględnieniem rentowności konkretnych sposobów realizacji takiego typu chłodzenia wraz z algorytmem doboru maszyn i urządzeń chłodniczych.

Kolejne badania powinny udokumentować rzeczywiste oszczędności i sens stosowania tego typu rozwiązań w polskich warunkach klimatycznych. Istnieje szansa, że dokładnie określone zostaną warunki doboru, optymalnej pracy i przewidywanej amortyzacji urządzeń do free-cooling. Przeprowadzone badania mogą wykazać, że mimo utartych poglądów i efektu cieplarnianego, stosowanie rozwiązań opartych o free-cooling w polskim górnictwie będzie miało wymierne wyniki w postaci znacznych korzyści finansowych, wynikających z oszczędności energii, której koszt cały czas rośnie.

Bibliografia

1. Białko B., Królicki Z.: Wybrane aspekty zastosowania systemu free-cooling w instalacjach realizujących obiegi lewobieżne. *Chłodnictwo & Klimatyzacja* nr 4, 2006.
2. De Saulles T.: Free cooling revisited. *Fuel and Energy Abstract*, v. 37, no. 4. Elsevier, Amsterdam 2004.
3. De Saulles T.: Free cooling systems. BG nr 8/2004. BSRIA, UK 2004.
4. Lazzarin R.M.: Introduction of a simple diagram-based method for analyzing evaporative cooling. *Applied Thermal Engineering*, v. 27. Elsevier, Amsterdam 2007.
5. Pupik K.: Free-cooling jako sposób na oszczędność energii elektrycznej. *Chłodnictwo & Klimatyzacja*, nr 5, 2005.
6. Koman M., Włodarczyk W.: Stan zagrożenia klimatycznego i sposoby jego zwalczania w KGHM "Polska Miedź" SA Oddział Zakłady Górnicze "Rudna" w Polkowicach. *Wiadomości Górnicze*, nr 2, s. 103-110. Wydawnictwo Górnicze Sp. z o.o., Katowice 2008.
7. Szlązak N., Obracaj D., Borowski M.: „Free-cooling” w klimatyzacji kopalń podziemnych. *Wiadomości Górnicze*, nr 2, s. 97-102. Wydawnictwo Górnicze Sp. z o.o., Katowice 2008.
8. Tu R., Huang L., Jin A., et al. Characteristic studies of heat sources and performance analysis of free-cooling assisted air conditioning and ventilation systems for working faces of mineral mines. *Build. Simul.* 14, 1725–1736 (2021). <https://doi.org/10.1007/s12273-021-0772-0>
9. Costelloe B., Finn D.P.: Heat transfer correlations for low approach evaporative cooling systems in buildings. *Applied Thermal Engineering*, v. 27. Elsevier, Amsterdam 2007.
10. Costelloe B., Finn D.P.: Heat transfer correlations for low approach evaporative cooling systems in buildings. *Applied Thermal Engineering*, v. 28. Elsevier, Amsterdam 2008.

16. STUDENCI O TRANSFORMACJI ENERGETYCZNEJ – WYNIKI BADANIA ILOŚCIOWEGO

16.1. Wprowadzenie

Zmiany klimatyczne spowodowały, że ochrona klimatu stała się bardzo ważna i funkcjonuje w świadomości społeczeństwa już od wielu lat, a osiągnięcie neutralności klimatycznej jest szeroko dyskutowane zarówno w środowisku akademickim, wśród polityków, jak i w społeczeństwie obywatelskim.

Osiągnięcie neutralności klimatycznej wymaga transformacji energetycznej, której celem jest odejście od paliw kopalnych, głównie węgla, ale również gazu ziemnego i paliw ropopochodnych. Wiąże się to z przebudową całej energetyki, zarówno elektroenergetyki, jak i sektorów ciepła oraz paliw transportowych. Istotna jest również efektywność energetyczna, która wymaga wprowadzania efektywnych rozwiązań zarówno w aspekcie ograniczanie zużycia energii elektrycznej (np. przez zwiększenie sprawności urządzeń), jak i ograniczenia zużycia ciepła (np. przez pasywizację budownictwa) oraz paliw ropopochodnych (przez elektryfikację transportu).

W Polsce proponowane są dwa modele transformacji energetycznej. Pierwszy to energetyka scentralizowana, w której zapewnienie bezpieczeństwa energetycznego realizowane jest przez wielkie farmy fotowoltaiczne i wiatrowe, centralnie zarządzane duże magazyny energii, zarówno elektrochemiczne, jak i np. wodorowe, ze stabilizacją systemu w postaci elektrowni gazowych, również centralnie sterowanych. W tym modelu energetyka korporacyjna (operatorzy dystrybucyjni i operator przesyłowy) pełni dominującą rolę, a rola prosumentów jest mocno ograniczona. Drugi proponowany model rozwoju to energetyka oddolna, rozproszona, elektroprosumeryzm [1]. W modelu tym zakłada się maksymalizację wykorzystania lokalnych zasobów na każdym poziomie napięć, w osłonach kontrolnych [2], czyli bilansujących się obszarach powiązanych z elektroprosumentami. Elektroprosumentem może być każdy podmiot, który wykorzystuje jedynie energię elektryczną do zaspokojenia wszystkich potrzeb energetycznych, a także zarządza

swoimi zasobami zarówno po stronie popytowej, jak i podażowej. Wykorzystanie jedynie energii elektrycznej do zaspokajania własnych potrzeb wynika z jej wysokiej efektywności [3], czyli ograniczenia wykorzystania energii pierwotnej.

Każdy z modeli wymaga przebudowy obecnego systemu energetycznego i obejmuje praktycznie całą obecną gospodarkę. Wymaga to zwiększenia kompetencji całego społeczeństwa. Budowa kompetencji jest istotna, zwłaszcza w elektroprosumeryzmie, ponieważ wymaga on aktywnego uczestnictwa każdego odbiorcy energii. Należy również podkreślić, że w obydwóch modelach bardzo istotne są rozwiązania techniczne, chociaż innego typu, a w modelu elektroprosumeryzmu tak samo ważny jest aspekt społeczny, czyli gotowość na zmianę swoich przyzwyczajzeń w celu, przynajmniej częściowego, dopasowania swojego zużycia do zmieniającej się produkcji energii w źródłach pogodowo zależnych. Alternatywnie model ten będzie wymagał bardzo dużych nakładów inwestycyjnych w technologie.

W modelu scentralizowanym zakłada się stopniowe, ewolucyjne odchodzenie od paliw kopalnych. W efekcie model ten zakłada, że przez następnych 15 lat podstawą do wytwarzania energii elektrycznej będzie węgiel i gaz. W modelu energetyki rozproszonej dąży się do szybkiego rozwoju OZE, które mają zastąpić źródła konwencjonalne.

16.2. Cel i metodyka badań

Badanie wiedzy i świadomości z zakresu transformacji energetycznej prowadzone jest systematycznie przez CBOS (Centrum Badania Opinii Społecznej). Są to badania na próbach reprezentatywnych dla całego społeczeństwa i obejmują aspekty związane m.in. z ochroną środowiska, rozwojem energetyki odnawialnej czy budową elektrowni jądrowych w Polsce.

Celem prezentowanych w rozdziale wyników badań jest opis stosunku studentów do transformacji energetycznej. Badania zostały przeprowadzone przez autorów w Politechnice Śląskiej, w dniach 05–18 maja 2023 roku na grupie 235 studentów z różnych kierunków. Około 40% badanych studiuje na kierunku technicznym związanym z energetyką, takim jak: elektrotechnika, energetyka czy inżynieria środowiska, 25% to studenci kierunków technicznych niezwiązanych z energetyką, np. architektura czy transport, natomiast 35% to studenci kierunków nietechnicznych, w tym ekonomii i zarządzania.

Badanie zostało przeprowadzone za pomocą anonimowej ankiety internetowej i obejmowało (poza metryczką) siedem obszarów tematycznych, mianowicie: elektrownie węglowe, fotowoltaikę, elektrownie biogazowe, pompy ciepła, elektrownie wiatrowe, transformację energetyczną oraz politykę klimatyczną. Każdy obszar zawierał krótkie wprowadzenie, opisujące analizowane zagadnienie.

W artykule zostaną przedstawione i omówione wyniki tego badania. Wybrane pytania porównano z wynikami badań realizowanych przez CBOS. Należy podkreślić, że w przypadku badań prowadzonych przez CBOS stosowane były trzy metody badawcze: wywiad bezpośredni, wywiad telefoniczny i ankieta internetowa z mniej więcej równym udziałem liczby badanych w każdej metodzie. Sposób uzyskania wyników różni się więc od tego prezentowanego w artykule, niemniej dokonanie tego porównania uznaje się za interesujące poznawczo.

Wyniki przeprowadzonego badania ilościowego opisane są w podziale na obszary tematyczne. Każdy obszar zawiera wprowadzenie w postaci informacji zawartej w ankiecie (zaznaczone kursywą) oraz uzyskane wyniki badania wraz z komentarzem.

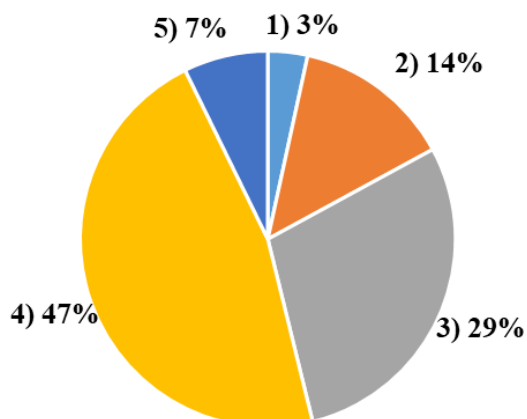
16.2.1. Elektrownie węglowe

W Polsce 75% energii elektrycznej jest wytwarzanej przez elektrownie węglowe. Ten sposób funkcjonowania systemu elektroenergetycznego jest uzasadniany na różne sposoby.

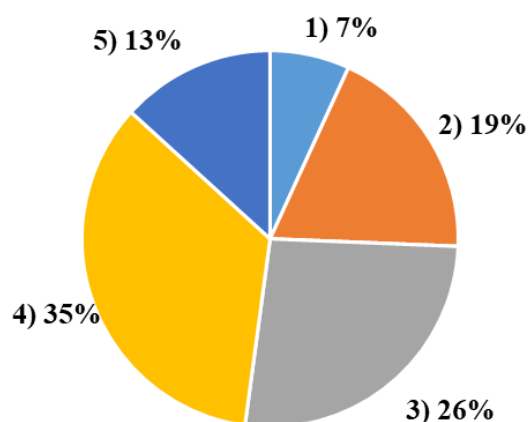
Przeprowadzone badanie jednoznacznie dowodzi, że według ankietowanych elektrownie węglowe stanowią poważne zagrożenie dla środowiska naturalnego. Uważa tak aż 76% badanych (rys. 16.1a). Jednak niepokoi fakt, że w dalszym ciągu 17% ankietowanych uważa, że wytwarzanie energii bazując na węglu nie wpływa na środowisko naturalne. Jednocześnie 61% ankietowanych (rys. 16.1b) uważa, że elektrownie jądrowe są bezpieczniejsze od elektrowni węglowych.

O tym, że Polska jest niezależna od innych krajów dzięki wytwarzaniu energii elektrycznej z węgla sądzi 53% ankietowanych (rys. 16.1c). Jest to stosunkowo mała grupa, zważywszy na to, że ponad 75% energii elektrycznej pochodzi ze spalania węgla. Dziwi jednak to, że aż 29% osób uważa (rys. 16.1d), że energia wytwarzana z węgla jest tańsza od energii wytwarzanej dzięki źródłom odnawialnym, a 16% nie ma na ten temat zdania, tym bardziej, że już obecnie źródła odnawialne są tańsze, a tendencja wzrostu cen węgla [4] wpływa jeszcze silniej na korzyść energetyki odnawialnej.

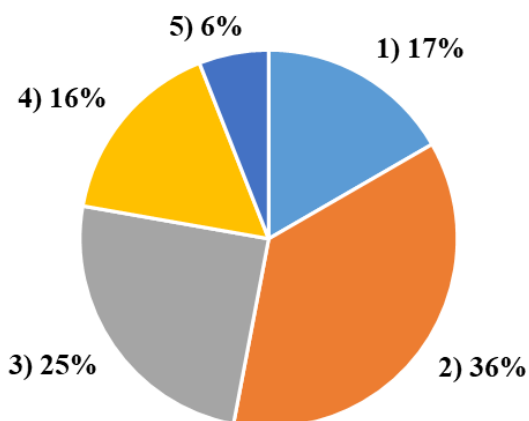
a) Elektrownie węglowe nie stanowią poważnego zagrożenia dla środowiska naturalnego



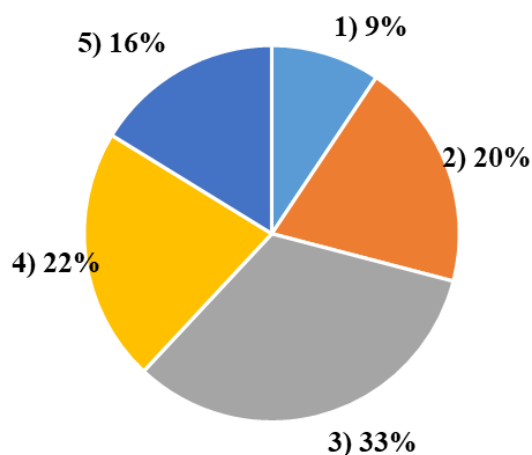
b) Elektrownie węglowe są bardziej bezpieczne niż elektrownie jądrowe



c) Dzięki wytwarzaniu energii elektrycznej z węgla Polska jest niezależna od innych krajów



d) Energia z węgla jest tańsza od wytwarzanej ze źródeł odnawialnych (słońce, wiatr)



- 1) Zdecydowanie się zgadzam
- 2) Raczej się zgadzam
- 3) Raczej się nie zgadzam
- 4) Zdecydowanie się nie zgadzam
- 5) Nie mam zdania

Rys. 16.1. Wyniki badania w obszarze tematycznym – elektrownie węglowe
Fig. 16.1. Research results in the area – coal power plants

16.2.2. Fotowoltaika

Fotowoltaika jest najtańszą oraz najbardziej rozpowszechnioną formą produkcji energii elektrycznej w gospodarstwach domowych. Charakteryzuje się wysoką dostępnością i łatwą instalacją, lecz produkcja energii przez tę technologię zależy

bezpośrednio od warunków pogodowych. Najkorzystniej jest wykorzystać energię wtedy, gdy jest produkowana, ale można również ją magazynować na okresy bez produkcji, np. za pomocą akumulatorów.

Blisko 80% badanych zgadza się ze stwierdzeniem, że instalacje fotowoltaiczne są opłacalne (rys. 16.2a). Potwierdza to, że jest to najbardziej rozpowszechniona forma produkcji energii w instalacjach rozproszonych, a blisko 40% badanych deklaruje, że ich (lub ich rodziców) dom wyposażony jest w instalację fotowoltaiczną.

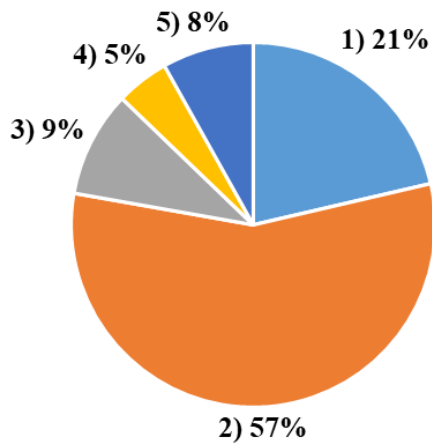
Jednocześnie 67% ankietowanych (rys. 16.2b) nie zgadza się ze stwierdzeniem, że fotowoltaika stwarza duże niebezpieczeństwo dla użytkowników, np. znacznie zwiększa ryzyko pożarów i porażen prądem elektrycznym, co również można rozpatrywać jako potwierdzenie tego, że większość ankietowanych zna tę technologię i nie stanowi ona dla nich niebezpieczeństwa.

Fotowoltaika nie mogłaby być w przyszłości głównym źródłem energii elektrycznej w Polsce. Uważa tak aż 62% ankietowanych (rys. 16.2c), a tylko 6% nie ma w tej kwestii zdania. Jest to osiągalne według 32% badanych (rys. 16.2c).

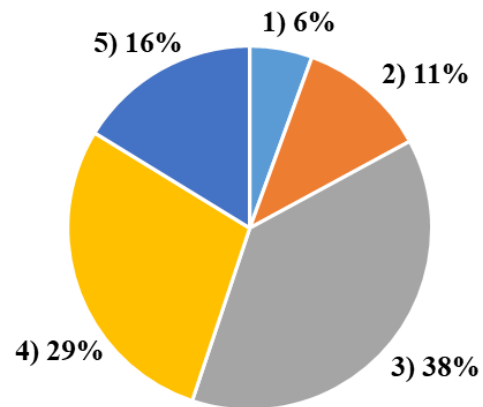
Możliwość zbilansowania osłon kontrolnych za pomocą źródeł OZE można uzyskać za pomocą rozwiązań technicznych, np. wielkich magazynów energii, co dla obecnych cen będzie bardzo droгим rozwiązaniem, albo wykorzystując elastyczność, czyli dopasowanie swojego zapotrzebowania do dostępności energii ze źródeł OZE, elektroprosumentów w modelu elektroprosumeryzmu, co znacznie ogranicza wielkość potrzebnych rozwiązań technicznych [2]. Wymaga jednak aktywnego uczestnictwa odbiorców i dopasowania swojego zużycia do aktualnej sytuacji. Mechanizm taki, zgodnie z zapowiedzianymi zmianami w ustawie Prawo energetyczne [5], będzie dostępny od przyszłego (2024) roku w postaci taryf dynamicznych, czyli godzinowej ceny energii. W ramach badań zapytano studentów, czy są gotowi zmienić swoje nawyki?

Swoich nawyków nie było gotowych zmienić 30% ankietowanych (rys. 16.3). 54% badanych mogłoby pracować, zmywać itp. w czasie największego nasłonecznienia. Tylko 35% osób była gotowa ograniczyć grzanie/chłodzenie, a 23% zrezygnować z ładowania samochodu elektrycznego. Najmniej skłonnych, tylko 18%, było do opóźnienia przygotowania posiłku.

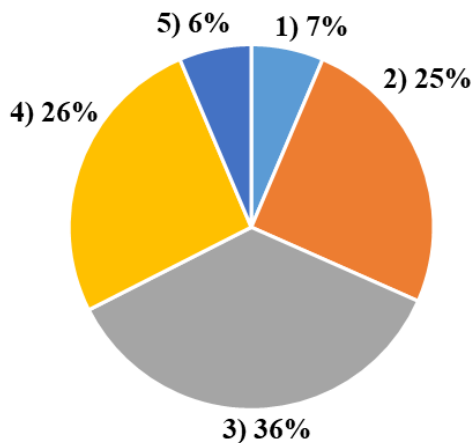
a) Zastosowanie instalacji fotowoltaicznej jest opłacalne



b) Fotowoltaika stwarza duże niebezpieczeństwo dla użytkowników, np. znacznie zwiększa ryzyko pożarów i porażen prądem elektrycznym



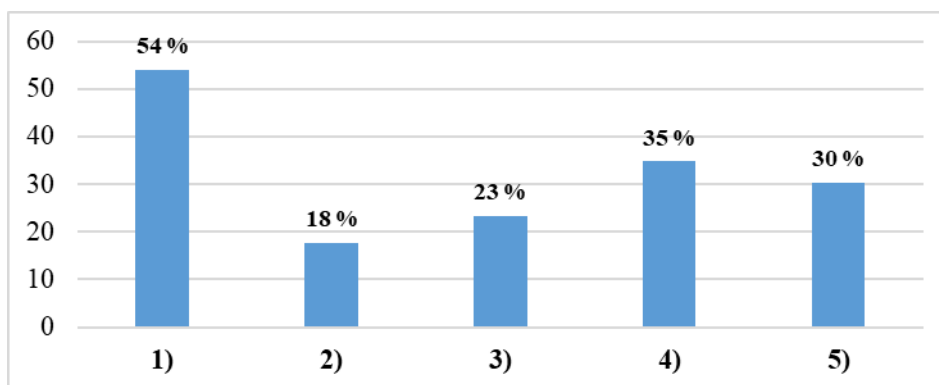
c) W przyszłości fotowoltaika mogłaby być głównym źródłem energii elektrycznej w Polsce



- 1) Zdecydowanie się zgadzam
- 2) Raczej się zgadzam
- 3) Raczej się nie zgadzam
- 4) Zdecydowanie się nie zgadzam
- 5) Nie mam zdania

Rys. 16.2. Wyniki badania w obszarze tematycznym – fotowoltaika
 Fig. 16.2. Research results in the area – photovoltaics

Uzyskane wyniki pokazują, że duża część studentów nie jest skłonna zmieniać swoich nawyków. Jeżeli już, to są to działania, które w małym stopniu wpływają na ich komfort.



Jako odbiorca energii, w celu lepszego wykorzystania źródeł fotowoltaicznych, mógłbym/mogłabym zmienić swoje nawyki, takie jak:

- 1) Pracę, zmywać itd. wtedy, kiedy jest największe nasłonecznienie
- 2) Opóźnić przygotowanie posiłku
- 3) Zrezygnować z ładowania samochodu elektrycznego w czasie małej produkcji energii z fotowoltaiki
- 4) Ograniczyć ogrzewanie/chłodzenie
- 5) Nie jestem gotów/gotowa w żadnym stopniu zmienić swoich nawyków

Rys. 16.3. Wyniki badania gotowości zmian swoich nawyków w celu efektywniejszego wykorzystania energii ze źródeł OZE

Fig. 16.3. Readiness to change habits in order to use energy from RES sources more efficiently

16.2.3. Elektrownie biogazowe

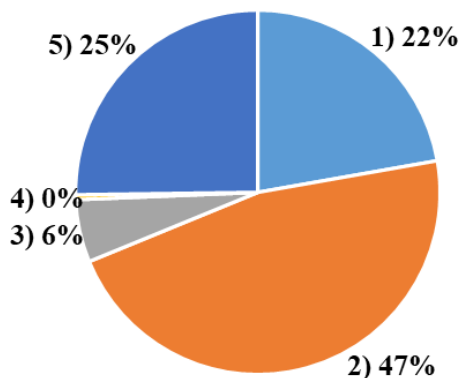
Elektrownie biogazowe to technologia zaliczana do OZE, wykorzystująca do produkcji energii elektrycznej odpady lub uprawy energetyczne. Charakteryzuje się produkcją energii elektrycznej niezależnie od warunków atmosferycznych. Elektrownie biogazowe stanowią lokalne źródło energii, uzupełniające produkcję ze źródeł pogodowo zależnych, np. źródeł PV i elektrowni wiatrowych.

Elektrownie biogazowe to technologia najslabiej znana studentom. Trzeba zaznaczyć, że we wszystkich pytaniach występuje duży odsetek odpowiedzi „Nie mam zdania”, co świadczy o małej znajomości tematyki biogazowni. Tak odpowiedziało od 21% badanych w pytaniu o nieprzychylną opinię o technologii (rys. 16.4c) oraz aż 38% w pytaniu dotyczącym emisji gazów cieplarnianych (rys. 16.4b). Jest to obszar, który wymaga zwiększenia kompetencji, ponieważ elektrownie biogazowe, jako źródła z możliwością bilansowania są istotnym elementem transformacji energetycznej, tym bardziej, że potencjał substratów w Polsce dla tej technologii jest duży i niewykorzystany [6].

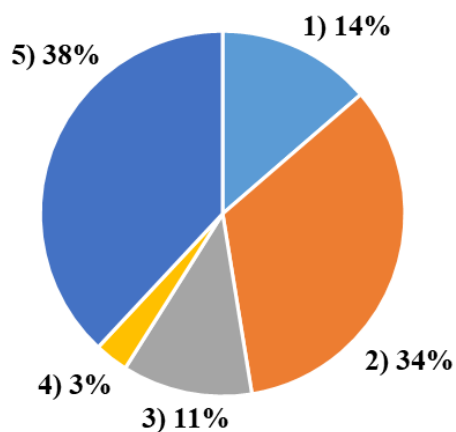
Niemniej 69% badanych (rys. 16.4a) uważa, że elektrownie biogazowe mają pozytywny wpływ na zwiększenie bezpieczeństwa energetycznego w bezpośrednim

otoczeniu i blisko tyle samo osób (67%, rys. 16.4c) dostrzega problem, że technologia ta może budzić sprzeciw lokalnej społeczności. Również większość (48%, rys. 16.4b) osób zgadza się, że utylizacja odpadów w elektrowniach biogazowych obniża emisję gazów cieplarnianych.

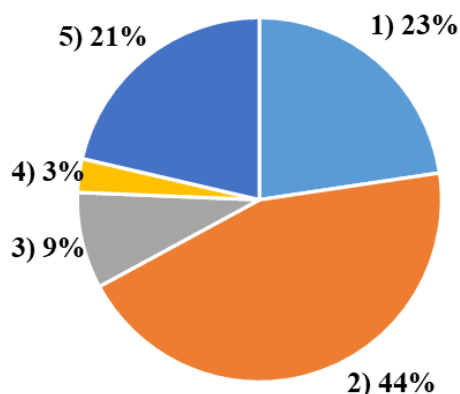
a) Elektrownie biogazowe mają pozytywny wpływ na zwiększenie bezpieczeństwa energetycznego w bezpośrednim otoczeniu



b) Utylizacja odpadów w elektrowniach biogazowych obniża emisję gazów cieplarnianych



c) Elektrownie biogazowe mogą spotykać się z nieprzychylną opinią społeczną ze względu na pogląd o uciążliwym działaniu technologii, zwłaszcza w aspekcie nieprzyjemnego zapachu



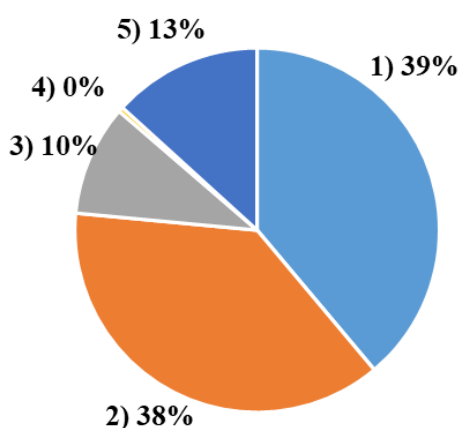
- 1) Zdecydowanie się zgadzam
- 2) Raczej się zgadzam
- 3) Raczej się nie zgadzam
- 4) Zdecydowanie się nie zgadzam
- 5) Nie mam zdania

Rys. 16.4. Wyniki badania w obszarze tematycznym – elektrownie biogazowe
Fig. 16.4. Research results in the area – biogas power plants

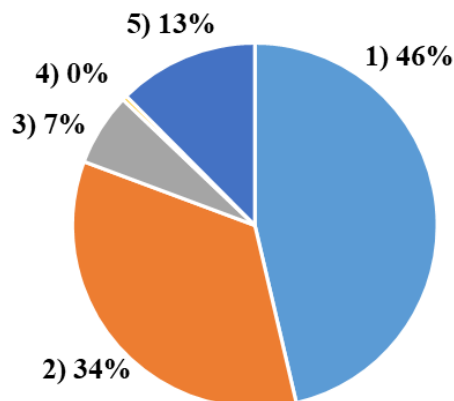
16.2.4. Pompy ciepła

Pompa ciepła stanowi alternatywę dla klasycznego systemu ogrzewania (węgiel, gaz), wykorzystując do tego energię elektryczną. Charakteryzuje się co najmniej trzykrotnie wyższą sprawnością w porównaniu z klasycznym ogrzewaniem, ale zarazem wysokim kosztem inwestycyjnym.

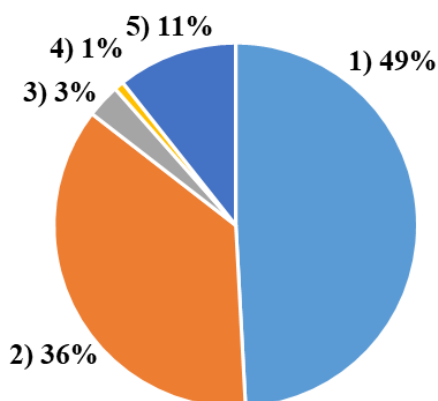
a) Poprawnie dobrana pompa ciepła pokryje pełne zapotrzebowanie na ciepło w budynku



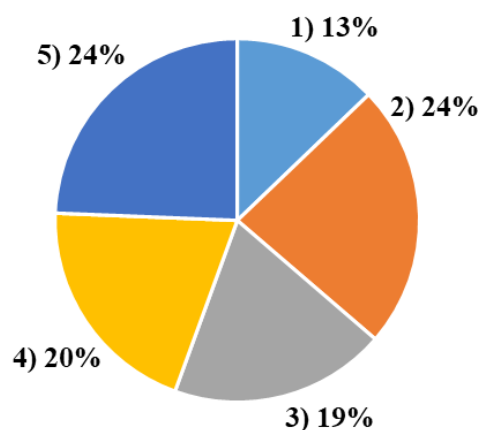
b) Bez przeprowadzenia termomodernizacji (ocieplenie, wymiana okien, wymiana drzwi itp.) wykorzystanie pompy ciepła będzie wiązało się z wysokim kosztem użytkowania



c) Korzystanie z pomp ciepła współpracujących ze źródłami odnawialnymi obniża koszty użytkowania



d) Nowe budynki powinny mieć obowiązek instalowania pomp ciepła współpracujących z fotowoltaiką



- 1) Zdecydowanie się zgadzam
- 2) Raczej się zgadzam
- 3) Raczej się nie zgadzam
- 4) Zdecydowanie się nie zgadzam
- 5) Nie mam zdania

Rys. 16.5. Wyniki badania w obszarze tematycznym – pompy ciepła
Fig. 16.5. Research results in the area – heat pump

Pompa ciepła nie jest tak popularną technologią jak fotowoltaika, ale blisko 20% ankietowanych deklaruje, że z niej korzysta. Również znaczna większość badanych (77%, rys. 16.5a) uważa, że poprawnie dobrana pompa ciepła pokryje pełne

zapotrzebowanie na ciepło w domu. Jeszcze więcej, bo aż 80% osób (rys. 16.5b) uważa, że bez przeprowadzenia termomodernizacji wykorzystanie pompy ciepła będzie wiązało się z wysokimi kosztami użytkowania.

Współpraca pomp ciepła ze źródłami OZE obniża koszt jej użytkowania według 85% ankietowanych. Jednak w kwestii obowiązku instalowania pomp ciepła współpracujących z fotowoltaiką w nowych budynkach zdania są podzielone w równym stopniu. Za obowiązkiem opowiada się 37%, a 39% jest przeciw (rys. 16.5d). Na to pytanie nie zna odpowiedzi blisko co czwarty ankietowany (24%, rys. 16.5d).

Świadomość technologii pomp ciepła jest duża wśród studentów i technologia ta jest pozytywnie postrzegana, jednak zdania ankietowanych są podzielone co do obowiązku jej instalacji.

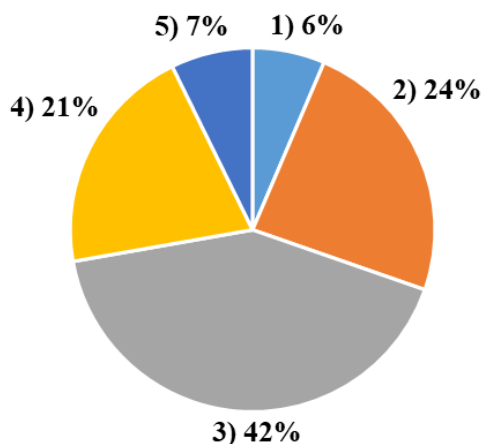
16.2.5. Elektrownie wiatrowe

Elektrownie wiatrowe opierają się na produkcji energii elektrycznej przez wykorzystanie wiatru. Obecnie w Polsce elektrownie wiatrowe pokrywają około 14% zapotrzebowania na energię. Z tą technologią wiążą się plany inwestycyjne na przyszłość, o czym świadczy budowa elektrowni morskich na Bałtyku. Mimo dużych kosztów inwestycyjnych związanych z budową tego rodzaju elektrowni, cena energii przez nie produkowanej jest niska.

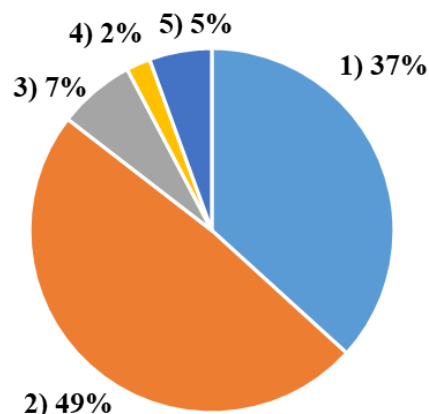
Podobnie jak w przypadku fotowoltaiki (rys. 16.2c), również elektrownie wiatrowe (według badanych) nie mogą być głównym źródłem energii w Polsce w przyszłości. Uważa tak aż 63% ankietowanych (rys. 16.6a). Jedynie 30% studentów twierdzi, że jest to możliwe.

Studenci uważają ponadto, że budowa morskich elektrowni wiatrowych na Bałtyku zwiększy niezależność energetyczną Polski sądzi tak aż 86% badanych.

a) W przyszłości elektrownie wiatrowe mogłyby być głównym źródłem energii elektrycznej w Polsce



b) Budowa morskich elektrowni wiatrowych na Bałtyku zwiększy niezależność energetyczną Polski



- 1) Zdecydowanie się zgadzam
- 2) Raczej się zgadzam
- 3) Raczej się nie zgadzam
- 4) Zdecydowanie się nie zgadzam
- 5) Nie mam zdania

Rys. 16.6. Wyniki badania w obszarze tematycznym – elektrownie wiatrowe
Fig. 16.6. Research results in the area – wind farm

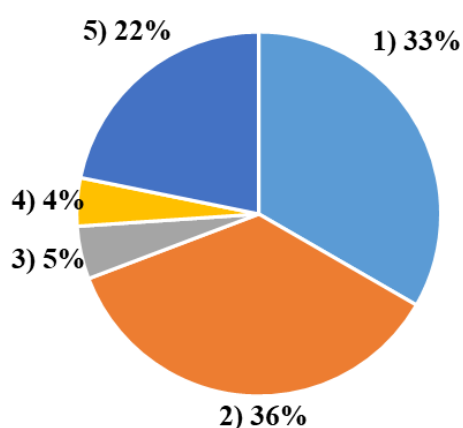
16.2.6. Transformacja energetyczna

Aktualnie brane pod uwagę są dwa, konkurencyjne scenariusze transformacji energetycznej w Polsce. Scenariusz energetyki scentralizowanej to państwowe duże źródła węglowe, gazowe, jądrowe, duże farmy fotowoltaiczne i wiatrowe, natomiast energetyka rozproszona to koncepcja dostarczania energii elektrycznej społecznościom lokalnym przez małe źródła odnawialne.

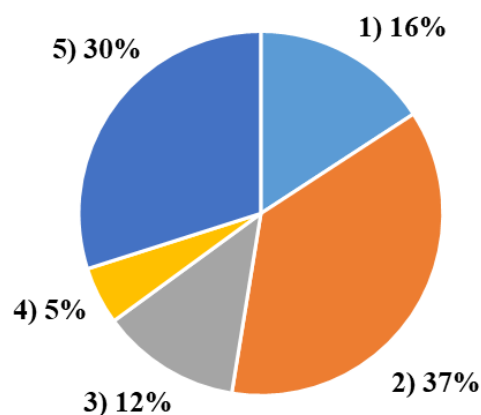
Kluczowe pytania o transformację energetyczną pozwalają stwierdzić, że większość ankietowanych opowiada się za modelem rozproszonym energetyki. Aż 69% badanych (rys. 16.7a) uważa, że energetyka rozproszona zapewnia większe bezpieczeństwo energetyczne w porównaniu z modelem centralnym, a tylko 9% uważa, że większe bezpieczeństwo zapewnia model centralny. Jednak 22% nie ma zadania, co świadczy o tym, że również w tym obszarze potrzebna jest budowa kompetencji. Większość (53%, rys. 16.7b) deklaruje, że energetyka rozproszona powoduje obniżenie kosztów, jednak blisko co trzeci ankietowany (30%, rys. 16.7b) nie ma zdania na ten temat. Aż 48% studentów (rys. 16.7c) uważa, że nie jest możliwe

pokrycie pełnego zapotrzebowania za pomocą źródeł OZE. O tym, że jest to możliwe sędzi niewielu, bo 41% (rys. 16.7c). 37% ankietowanych uważa, że bez korzystania z elektrowni węglowych nie jest możliwe zapewnienie bezpieczeństwa energetycznego w Polsce. Jest to ciągle jeszcze duży odsetek badanych, ale już niewiele ponad jedna trzecia.

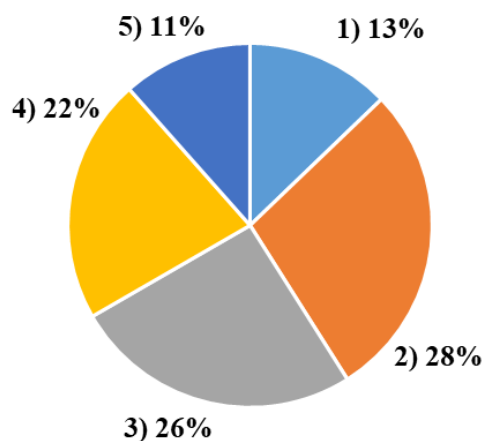
a) Energetyka rozproszona zapewnia większe bezpieczeństwo energetyczne w porównaniu z modelem centralnym



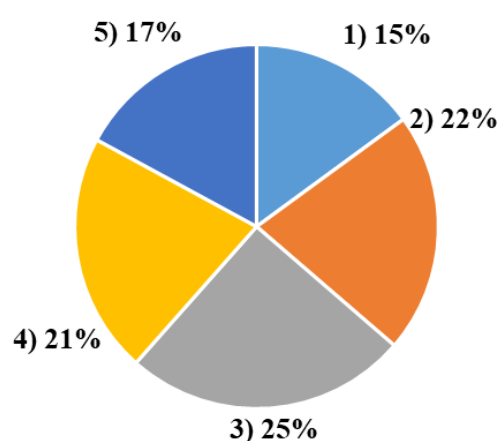
b) Energetyka rozproszona ze względu na niskie ceny energii powoduje obniżenie kosztów utrzymania



c) Możliwe jest pełne pokrycie potrzeb energetycznych za pomocą źródeł odnawialnych



d) Zapewnienie bezpieczeństwa energetycznego w Polsce nie jest możliwe bez korzystania z elektrowni węglowych



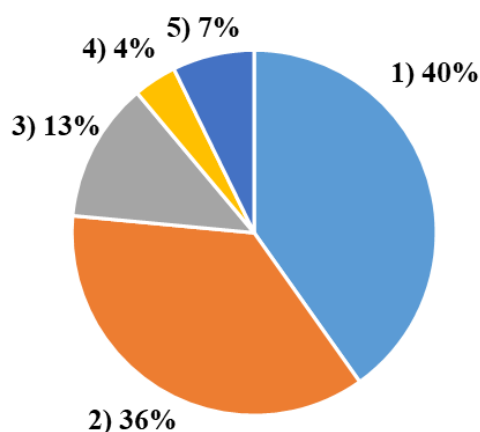
- 1) Zdecydowanie się zgadzam
- 2) Raczej się zgadzam
- 3) Raczej się nie zgadzam
- 4) Zdecydowanie się nie zgadzam
- 5) Nie mam zdania

Rys. 16.7. Wyniki badania w obszarze tematycznym – elektrownie wiatrowe
Fig. 16.7. Research results in the area – wind farm

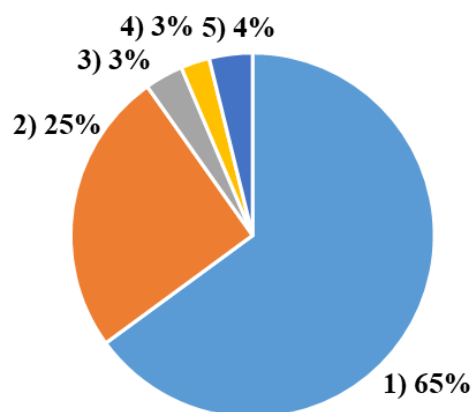
O ile większość uważa, że energetyka rozproszona jest tańsza, o tyle co do tego, czy możliwe jest za jej pomocą pokrycie zapotrzebowania zdania są podzielone, ale ze wskazaniem na brak takiej możliwości. Większość uważa, że elektrownie węglowe nie są potrzebne do zapewnienia bezpieczeństwa energetycznego, jednak w dalszym ciągu ponad jedna trzecia badanych uważa, że są one niezbędne.

Zdecydowana większość (76%, rys. 16.8a) uważa, że konieczna jest zmiana polityki energetycznej na wspierającą rozwój źródeł odnawialnych, a 90% badanych reprezentuje pogląd, że transformacja energetyczna wymaga zwiększenia świadomości (rys. 16.8b).

a) Potrzebna jest zmiana polityki energetycznej na wspierającą rozwój źródeł odnawialnych



b) Transformacja energetyczna wymaga zwiększenia świadomości energetycznej społeczeństwa



- 1) Zdecydowanie się zgadzam
- 2) Raczej się zgadzam
- 3) Raczej się nie zgadzam
- 4) Zdecydowanie się nie zgadzam
- 5) Nie mam zdania

Rys. 16.8. Wyniki badania w obszarze tematycznym – elektrownie wiatrowe
Fig. 16.8. Research results in the area – wind farm

16.2.7. Polityka klimatyczna

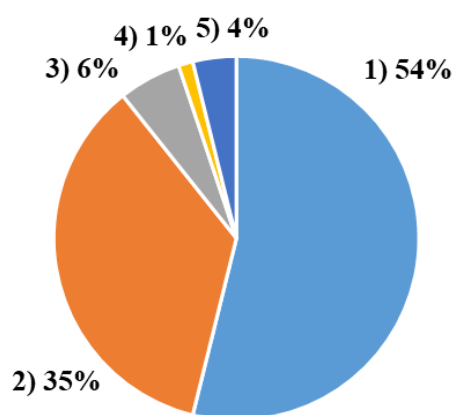
Od 2020 roku Komisja Europejska realizuje strategię Zielonego Ładu. Jest to plan osiągnięcia do 2050 roku zerowego poziomu emisji gazów cieplarnianych. Cele tego planu to zapobieganie zmianom klimatu oraz ochrona środowiska naturalnego.

Ankietowani w obszarze tematycznym związanym z polityką klimatyczną jednoznacznie uważają, że aspekty środowiskowe są bardzo ważne i mają wyrobione

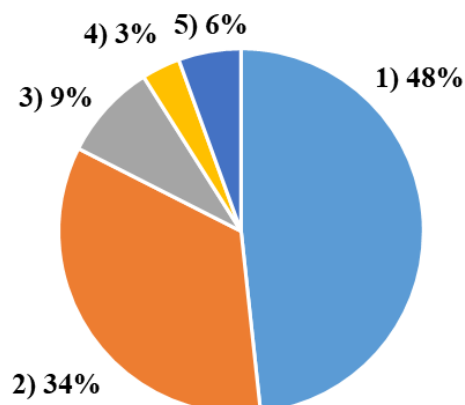
zdanie na ten temat. Aż 89% (rys. 16.9a) problem ochrony środowiska uważa za ważny, a 82% (rys. 16.9b) również to, że ważne są zmiany klimatyczne. Natomiast kwestia zapewnienia czystego powietrza jest ważna dla 93% ankietowanych.

Polityka klimatyczna i kwestie środowiskowe, ze względu na obecność w mediach od znacznie dłuższego czasu, tak jak transformacja energetyczna, spowodowały, że świadomość studentów w tym obszarze jest znacznie większa, tylko nieliczni ankietowani nie mają zdania na ten temat.

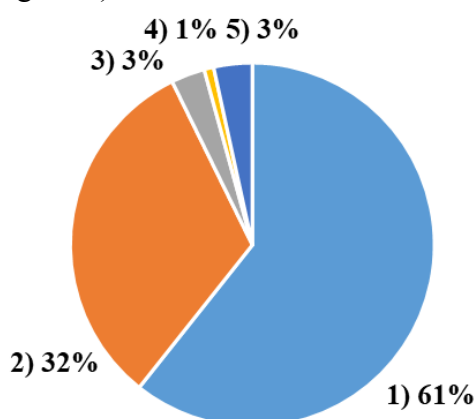
a) Jak ważnym problemem jest twoim zdaniem ochrona środowiska naturalnego?



b) Jak ważnym problemem są twoim zdaniem zmiany klimatu?



c) Jak ważna jest dla Ciebie kwestia zapewnienia czystego powietrza przez zmniejszenie zapylenia (np. dzięki ograniczeniu smogu w miastach) oraz ograniczenia emisji związków siarki (szkodliwych dla zdrowia gazów)?



- 1) Bardzo ważnym
- 2) Raczej ważnym
- 3) Raczej nieważnym
- 4) W ogóle nieważnym
- 5) Trudno powiedzieć

Rys. 16.9. Wyniki badania w obszarze tematycznym – polityka klimatyczna
Fig. 16.9. Research results in the area – climate policy

16.3. Porównanie opinii społeczeństwa z opinią studentów o transformacji energetycznej

Przeprowadzone badania ankietowe potwierdziły, że transformacja energetyczna wymaga zwiększenia świadomości i kompetencji w społeczeństwie (rys. 16.8b). W środowisku akademickim, jako środowisku przyszłych osób kształtujących politykę kraju, należałoby się spodziewać, że transformacja energetyczna powinna być priorytetem. Niestety uzyskane w wśród studentów wyniki w większości przypadków charakteryzują się podobnym rozkładem jak w całym społeczeństwie.

W pytaniu o horyzont osiągnięcia neutralności klimatycznej, rozkład odpowiedzi jest bardzo do siebie zbliżony (tab. 16.1), a ponad 55% ankietowych w obu grupach społecznych uważa, że Polska powinna dochodzić do neutralności klimatycznej w swoim tempie, nawet jeśli będzie to oznaczało, że osiągnie ją po 2050 roku.

Tabela 16.1

Dążenie do neutralności klimatycznej

Do 2050 roku państwa Unii Europejskiej mają osiągnąć neutralność klimatyczną: ograniczyć emisję gazów cieplarnianych, które przyczyniają się do ocieplania klimatu, w tym dwutlenku węgla		
Czy Polska powinna dążyć, aby osiągnąć ten cel?	Badanie CBOS [7]	Ankieta studencka
Jak najszybszej, jeszcze przed 2050 rokiem	21%	18%
Do 2050 roku	17%	15%
Polska powinna dochodzić do neutralności klimatycznej w swoim tempie, nawet jeśli będzie to oznaczało, że osiągniemy ją po 2050 roku	55%	58%
Trudno powiedzieć	7%	9%

W pytaniu o rozwój źródeł energii (tab. 16.2) 47% studentów opowiedziało się za rozwojem źródeł OZE. Jest to wynik wyższy o 16 punktów procentowych od opinii całego społeczeństwa. Mniejsza liczba ankietowanych wśród studentów opowiedziała się również za rozwojem obu gałęzi energetyki, czyli źródeł OZE i nieodnawialnych. Wyniki pokazują niewiele większą świadomość studentów w aspekcie rozwoju źródeł energii, chociaż w dalszym ciągu blisko 40% uważa, że energetyka OZE musi być uzupełniona przez źródła nieodnawialne.

Ponad połowa ankietowanych (51%) w badaniach CBOS-u uważa, że koszt energii ze źródeł wiatrowych jest niższy (tab. 16.3) w porównaniu z energią elektryczną wyprodukowaną z węgla. W przypadku studentów jest to o 11 punktów procentowych

mniej (40%). Niepokoi również to, że podobny odsetek badanych nie potrafi odpowiedzieć na to pytanie.

Tabela 16.2

Rozwój źródeł energii

Czy uważasz, że obecnie należy skoncentrować się na rozwoju:	Badanie CBOS [7]	Ankieta studencka
Nieodnawialnych źródeł energii	8%	6%
Odnawialnych źródeł energii	31%	47%
Obu tych gałęzi energetyki w równym stopniu	56%	39%
Trudno powiedzieć	4%	8%

Wartość indeksu węgla dla energetyki na koniec ubiegłego roku wyniosła ponad 500 PLN/t, a w marcu było to już ponad 700 PLN/t [4], chociaż kopalnie oczekują stawek sięgających nawet 900 PLN/t. Jednocześnie na międzynarodowym rynku ARA (Amsterdam-Rotterdam-Antwerpia) ceny spadły do poziomu 560 PLN/t (125 \$/t), w porównaniu z końcem ubiegłego roku, gdzie ceny przekraczały 1000 PLN/t (230 \$/t). Perspektywa taniej energii elektrycznej z węgla jest bardzo nikła.

Tabela 16.3

Koszt energii elektrycznej

Jak sądzisz, czy koszt wyprodukowania energii przez farmy wiatrowe jest niższy, podobny czy wyższy niż koszt wyprodukowania energii elektrycznej z węgla?	Badanie CBOS [8]	Ankieta studencka
Niższy	51%	40%
Podobny	17%	23%
Wyższy	11%	14%
Trudno powiedzieć	21%	23%

Za budowę elektrowni jądrowych opowiada się w Polsce około 75% społeczeństwa (tabela 16.4). Rozkład zarówno w badaniu CBOS-u, jak i ankiecie studenckiej jest do siebie zbliżony. Tak wysokie poparcie wynika z bezkrytycznego przekazu medialnego i prowadzenia kampanii rządowej promującej energetykę jądrową. W przekazie publicznym mówi się o tej technologii jak o remedium na wszystkie problemy transformacji energetycznej. Technologia ta, mimo wcześniejszego, znacznie wyższego sprzeciwu społeczeństwa [9], stała się technologią „przyjazną”.

Budowa elektrowni jądrowych

Budowa elektrowni jądrowych ma swoich zwolenników i przeciwników.		
Gdyby poproszono Pana(ią) o zajęcie jednoznacznego stanowiska w sprawie budowy takich elektrowni w naszym kraju, to czy był(a)by Pan(i) za czy też przeciw?	Badanie CBOS [10]	Ankieta studencka
Sprzeciwiał(a)bym się budowie	13%	10%
Opowiadał(a)bym się za budową	75%	74%
Trudno powiedzieć	12%	17%

16.4. Podsumowanie

Obecna sytuacja geopolityczna i spowodowany nią skokowy wzrost cen nośników energii spowodował wzrost zainteresowania Polaków polityką energetyczną i funkcjonowaniem branży energetycznej [11]. Przeprowadzone przez CBOS badania [7, 8, 10] pozwoliły na obserwację świadomości energetycznej społeczeństwa, postrzeganej przede wszystkim przez pryzmat racjonalności i efektywności ekonomicznej. Większość ankietowanych opowiedziała się za wariantem kompromisowym, czyli równoległym rozwojem zarówno energetyki odnawialnej, jak i konwencjonalnej. Prawie jedna trzecia wybrała rozwój OZE. Odnosząc tę opinię do poglądów studentów, można zauważyć, że w tej grupie badanych blisko połowa (47%) opowiadała się za rozwojem źródeł OZE, ale również w tej grupie blisko 40% ankietowanych charakteryzuje się zachowawczą postawą i rozwojem obu gałęzi energetyki. Uzyskanie tego wyniku jest o tyle interesujące, że w badaniu CBOS-u grupa uczniów i studentów charakteryzowała się wyższym poziomem akceptacji, który zgodnie z [11] wyniósł 45%.

Drugim pytaniem, w którym zdiagnozowano niewielką rozbieżność w badaniu CBOS-u oraz ankiecie studenckiej było pytanie o porównanie kosztów wyprodukowanie energii elektrycznej z elektrowni wiatrowej w porównaniu z kosztami produkcji energii z elektrowni węglowych. Ponad połowa Polaków uważa, że energia z elektrowni wiatrowych jest tańsza, ale w przypadku studentów wynik ten jest o 11 punktów procentowych niższy. Badanie korelacji obydwu pytań wykazało [11], że stan wiedzy badanych o kosztach energii wpływa na opinię w sprawie kierunku rozwoju energetyki.

W przypadku studentów większość (61%), która wskazała, że koszt energii z elektrowni wiatrowych jest niższy, opowiada się za rozwojem źródeł OZE, ale

również za rozwojem źródeł OZE opowiada się 43% ankietowanych, którzy deklarują, że koszty energii są podobne oraz 38% uważających, że koszty te są wyższe. W każdym przypadku jest to najliczniejsza grupa badanych. Natomiast studenci, którzy nie potrafili wskazać tańszej technologii, deklarują 60% poparcie dla rozwoju obu gałęzi energetyki w równym stopniu.

W pozostałych pytaniach, mianowicie o dążeniu do neutralności klimatycznej oraz budowie elektrowni jądrowych, opinia studentów o transformacji energetycznej jest podobna do ogółu społeczeństwa.

16.4.1. Wnioski szczegółowe

Aż 61% ankietowanych uważa elektrownie węglowe za mniej bezpieczne od jądrowych, natomiast 76% uznaje, że stanowią one poważne zagrożenie dla środowiska. Mimo to 53% i tak jest zdania, że korzystanie z elektrowni węglowych zapewnia Polsce większą niezależność. Warto jednak podkreślić, że istotna część węgla pozyskiwana jest z importu, ze względu na jego wysoką cenę w polskich kopalniach. Również sytuacja geopolityczna wpłynęła na zmniejszenie zaufania do zapewnienia bezpieczeństwa energetycznego za pomocą paliw kopalnych.

Fotowoltaika cieszy się dobrą opinią wśród ankietowanych. Blisko 80% badanych zgadza się ze stwierdzeniem, że instalacje fotowoltaiczne są opłacalne, nie stwarzają dużego zagrożenia pożarowego i są bezpieczne. Jednak aż 62% badanych nie sądzi, że mogłyby one być jedynym źródłem energii elektrycznej w Polsce w przyszłości.

Efektywne wykorzystanie fotowoltaiki wiąże się z potrzebą zmiany nawyków użytkowników i maksymalizacją autokonsumpcji. W przeciwnym wypadku technologia ta może wpływać niekorzystnie na sieć i prowadzić do wzrostu kosztów ze względu na konieczność stosowania nieadekwatnych rozwiązań technicznych (np. ogromnych magazynów energii). Obecnie studenci w sposób ograniczony godzą się na zmianę swoich nawyków. Aż 30% ankietowanych nie jest gotowa, aby coś zmienić, a pozostałe osoby wskazują jedynie te elementy, które w małym stopniu wpływają na ich komfort, np. pranie czy zmywanie w czasie największego nasłonecznienia. Jednak opóźnienie przygotowania posiłku zadeklarowało jedynie 18% badanych.

Technologia elektrowni biogazowych jest najmniej znana wśród studentów. Jednak większość (48%) uważa, że utylizacja odpadów w elektrowniach biogazowych zmniejsza emisję szkodliwych gazów do atmosfery, chociaż może ona być przyczyną lokalnego sprzeciwu.

Pompa ciepła jest znaną i pozytywnie postrzeganą technologią. Aż 77% ankietowanych uważa, że może ona pokryć zapotrzebowanie na ciepło w budynkach. Dodatkowo większość badanych miała świadomość konieczności termomodernizacji budynku w celu efektywniejszego wykorzystania pomp ciepła. Dostrzega się również korzyści współpracy pompy ciepła z OZE. Zdania dotyczące obowiązku instalowania pomp ciepła współpracujących z fotowoltaiką w budynkach mieszkalnych są zdecydowanie podzielone w stosunku 37% za i 39% przeciw.

Elektrownie wiatrowe to technologia, która podobnie jak fotowoltaika nie jest uważana przez badanych jako ta, która mogłaby stanowić główne źródło energii w Polsce, a zdecydowana większość 86% zgadza się, że budowa elektrowni wiatrowej na Bałtyku zwiększy niezależność energetyczną Polski.

W kwestii transformacji energetycznej ankietowani twierdzą, że model rozproszony zapewni większe bezpieczeństwo energetyczne od modelu scentralizowanego. Większość również uważa model rozproszony za mniej kosztowny. Wśród ankietowanych powszechne jest to, że istnieje potrzeba zmiany polityki energetycznej na wspierającą rozwój OZE, a transformacja energetyczna wymagać będzie zwiększenia świadomości energetycznej.

Zakorzeniona w poglądach studentów jest kwestia ochrony środowiska i zmian klimatu. Zdecydowana większość uważa ten problem za niezwykle istotny. Większość jednak jest zdania, że do neutralności klimatycznej Polska powinna dochodzić we własnym tempie, nawet jeżeli oznaczać by to miało osiągnięcie jej po 2050 roku.

Bibliografia

1. Popczyk J.: Elektroprosumeryzm – czyli więcej niż neutralność klimatyczna, i energetyka. Biuletyn PPTE2050 nr 1(7)/2023. Energetyka, problemy energetyki i gospodarki paliwowo-energetycznej, 2023, nr 4, s. 261–288.
2. Bodzek K.: Rola osłon kontrolnych jednostek samorządu terytorialnego w elektroprosumeryzacji Polski. Biuletyn PPTE2050 nr 1(7)/2023. Energetyka, problemy energetyki i gospodarki paliwowo-energetycznej, 2023, nr 4, s. 308–317.
3. Stanek W.: Analiza egzergetyczna w teorii i praktyce. Monografia, Vol. 629, 2016, Politechnika Śląska, s. 267, ISBN 978-83-7880-415.
4. Platforma ARP: <https://polskirynekwegla.pl>.
5. Projekt ustawy o zmianie ustawy – Prawo energetyczne oraz niektórych innych ustaw, Kancelaria Prezesa Rady Ministrów, 18.04.2023, <https://www.gov.pl/web/premier/projekt-ustawy-o-zmianie-ustawy--prawo-energetyczne-oraz-niektorych-innych-ustaw4>.
6. Bojarski W., Pulka J., Pochwatka P., Bresz P., Nowak M., Dach J. (2023): Energetic Potential of Dairy Cow Breeding in Poland, [in:] Pascuzzi S., Santoro F. (eds.) Farm

Machinery and Processes Management in Sustainable Agriculture. FMPMSA 2022. Lecture Notes in Civil Engineering, vol 289. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-13090-8_12.

7. Komunikat CBOS Nr 30/23, „Postawy wobec transformacji energetycznej”.
8. Komunikat CBOS Nr 27/23, „Opinie o energetyce wiatrowej”.
9. Komunikat Ministerstwa Klimatu i Środowiska: Rekordowe poparcie – 86% Polaków za budową elektrowni jądrowych w Polsce, 15.12.2022, <https://www.gov.pl/web/klimat/rekordowe-poparcie--86-polakow-za-budowa-elektrowni-jadrowych-w-polsce>.
10. Komunikat CBOS Nr 151/2022, „Polacy o rozwoju energetyki jądrowej”.
11. Ruszkowski P.: Nowy gracz w polskiej energetyce. Rzeczpospolita, Energetyka, Energia news, 24.03.2023, <https://energia.rp.pl/energianews/art38380801-pawel-ruszkowski-nowy-gracz-w-polskiej-energetyce>.

17. EFEKTY I ZALECENIA KAMPANII EDUKACYJNEJ NA TEMAT ZAPOBIEGANIA ZANIECZYSZCZENIOM ORAZ GOSPODARKI OBIEGU ZAMKNIĘTEGO, Z WYKORZYSTANIEM DOŚWIADCZEŃ CZYSTSZEJ PRODUKCJI I EMAS

17.1. Wprowadzenie

Początki funkcjonowania programu Czystszej Produkcji w Polsce datowane są na 1990 rok. Uruchomiono wówczas tzw. Szkoły Czystszej Produkcji, które realizowały program edukacyjny i ekspercki, pomagając wdrażać w przedsiębiorstwach pierwsze projekty. Program jest realizowany do dziś, zmianie uległa jedynie nazwa kursu. Obecnie jest to Akademia Czystszej Produkcji. W artykule poddano analizie działania podejmowane przez firmy w ramach Akademii (Szkoł) CP w latach 1990–2022 oraz motywy tychże działań. Zweryfikowano wstępnie kierunki zmian i obszary wymagające wsparcia przez podmioty zewnętrzne. Wnioski są dobrą praktyką dla podmiotów, które poszukują najlepszych rozwiązań na drodze do zeroemisyjności.

Proces wdrażania strategii Czystszej Produkcji został opisany w licznych publikacjach [1–5], w artykule natomiast zweryfikowano czynniki, które mają wpływ na podjęcie przez kierownictwo firmy decyzji o realizacji Projektu Czystszej Produkcji oraz kontynuacji działań doskonalących, zgodnie z Cyklem PDCA.

W latach 2019–2023 Stowarzyszenie Polski Ruch Czystszej Produkcji zrealizowało projekt pt. „Kampania edukacyjna na temat zapobiegania zanieczyszczeniom oraz GOZ, z wykorzystaniem doświadczeń CP i EMAS”, dofinansowany przez Narodowy Fundusz Ochrony Środowiska i Gospodarki Wodnej (NFOŚiGW), w ramach programu priorytetowego Edukacja Ekologiczna i w ramach działań o szczególnym znaczeniu dla ministra właściwego do spraw środowiska [1].

W trakcie projektu zrealizowano: dwie konferencje inauguracyjną i zamykającą, liczne warsztaty, m.in.: „Ocena cyklu życia wyrobu (LCA), ślad węglowy, ekoprojektowanie – nowe narzędzia, metody i zastosowanie analiz środowiskowych w GOZ”, webinaria z podstaw Gospodarki o Obiegu Zamkniętym (GOZ), podstaw Czystszej Produkcji, Oceny Cyklu Życia produktów (LCA), podstaw EMAS, Zero

Waste, możliwości finansowania działań proekologicznych i nowych modeli biznesowych. Opracowano trzy animacje komputerowe, na temat podstaw: GOZ, CP oraz zarządzania środowiskowego. Wydano również publikacje: broszury – „Gospodarka Obiegu Zamkniętego – co oznacza dla nas jako producentów i konsumentów?” [6] oraz „CP i EMAS – jak racjonalnie doskonalić ochronę środowiska w firmie?” [7] i pozycję cyfrową: „Dobre praktyki i inwestycje – z programu Czystszej Produkcji” oraz dwa artykuły w czasopiśmie zwartych: „Czystsza Produkcja – praktyka i edukacja. Projekt #KampaniaGOZ” [8, 9]. Intensywna promocja projektu w mediach społecznościowych sprawiła, że łączny wskaźnik liczby osób bezpośrednio uczestniczących w projekcie oraz wyświetleń produktów projektu w Internecie pod koniec 2022 roku przekroczył 120 tys.

Projekt dał możliwość przeprowadzenia trzech edycji Akademii Czystszej Produkcji (ACP nr: 47, 48 i 49). Pracownicy przedsiębiorstw zarówno produkcyjnych, jak i usługowych, instytucje, a także placówki edukacyjne wzięły udział w dziewięciomiesięcznym szkoleniu, które obejmuje zarówno wykłady, jak i zajęcia warsztatowe, i zrealizowały w swoich organizacjach przykładową zmianę proekologiczną, czyli projekt Czystszej Produkcji, dającą zarówno efekty ekonomiczne, środowiskowe, jak i społeczne. W trakcie projektu przeszkolono 114 osób, spośród których 73 uzyskały tytuły Eksperta Czystszej Produkcji. W firmach biorących udział w trzech Akademii (47, 48, 49) wdrożono i obroniono w sumie 43 Projekty CP. W trakcie największej, Akademii nr 49, zrealizowano 20 Projektów Czystszej Produkcji (weryfikacja projektów trwała do maja br., stąd wynika różnica w danych w artykułach wcześniej publikowanych, np. [10]), które będą przynosić corocznie: redukcję odpadów o ponad 14 500 Mg, redukcję łącznych emisji gazowych o ponad 1250 Mg, redukcję zużycia wody o około 7 060 m³, redukcję zużycia energii elektrycznej o około 8 666 kWh oraz ponad 7 milionów złotych oszczędności (okres zwrotu nakładów – średnio około 6 lat).

Zestawienie uzyskanych przez firmy efektów pozwoliło na wstępne zaprezentowanie, powtarzalnych dla większości firm, efektów społecznych wdrożeń proekologicznych. Zaprezentowane (tab. 17.1) efekty wymagają w dalszych analizach szerokiego komentarza, a najpierw uzupełnienia o dane liczbowe wszędzie tam, gdzie jest to możliwe (przy ocenie postępów każdej firmy szczególnie istotny będzie pomiar skuteczności wdrażanych zmian za pomocą wskaźników KPI). Źródła literaturowe potwierdzają [11, 12], że sporządza się głównie kosztowe statystyki wdrożeń, analizując redukcję kosztów i stopę zwrotu, marginalnie traktując aspekty społeczne. Niemniej jednak raporty dobrych praktyk w bazach europejskich (np. EREK –

<https://clustercollaboration.eu/green/database>) bardzo szeroko uwzględniają wskaźniki dotyczące aspektów społecznych, stąd już na wstępie sporządzania raportu z projektu CP sygnalizowano duże zapotrzebowanie pogłębionych analiz w tym kierunku.

Tabela 17.1

Najczęściej raportowane efekty społeczne w Projektach CP na dzień 31.05.2023 r.
[opracowanie własne na podst. danych zaraportowanych przez firmy, które ukończyły Akademię CP: 47, 48, 49]

Dla przedsiębiorstw	Dla pracowników	Dla otoczenia gospodarczo-społecznego
Możliwość pozyskania nowych kadr Wzrost efektywności pracy Poprawa wizerunku Wzrost liczby klientów Poprawa przepływu informacji Usprawnienia procesów produkcyjnych Lepsza wydajność maszyn Brak konfliktów z mieszkańcami Dzięki oszczędnościom możliwość inwestowania w innych działaniach firmy	Wzrost świadomości ekologicznej Nauka i utrwalenie nawyków środowiskowych Poprawa komfortu i satysfakcji z pracy Wzrost bezpieczeństwa pracy Poprawa ergonomii stanowisk Integracja zespołowa	Poprawa sytuacji hydrologicznej (lokalnej i globalnej) Poprawa jakości życia Zmniejszenie kosztów dla klienta Aktywizacja szkół Integracja społeczności lokalnej, pokoleń, narodowości Upowszechnienie strategii CP Współtworzenie i współuczestnictwo w zakresie działań proekologicznych Poprawa jakości środowiska w efekcie zmniejszenia emisji CO ₂ oraz minimalizacji odpadów

17.2. Akademie (Szkoly) Czystszej Produkcji (ACP) – rys historyczny

Akademie Czystszej Produkcji są realizowane przez Stowarzyszenie od 1990 roku. Jest to autorski program edukacyjno-projektowo-wdrożeniowy, w ramach którego, w ciągu ok. 9 miesięcy w firmach realizujących projekt wdrażany jest system zarządzania środowiskowego (SZŚ), a uczestnicy uczą się zarządzania zgodnego z zasadami Czystszej Produkcji. Pilotujący każdy projekt eksperci CP pomagają wdrożyć przykładową zmianę proekologiczną (pilotażowy Projekt CP) i zaplanować przyszłe zmiany. Od 1996 roku formą certyfikacji wdrażanych przez Stowarzyszenie systemów zarządzania środowiskiem są Świadectwa CP, a dla najlepszych od 2002 roku prowadzony jest Polski Rejestr Czystszej Produkcji i Odpowiedzialnej Przedsiębiorczości (PRCPiOP).

W tabeli 17.2 zestawiono wszystkie zrealizowane od 1990 roku Akademie Czystszej Produkcji, ze wskazaniem dotacji lub innych aspektów motywujących przedsiębiorstwa do udziału, liczbę Akademii w trakcie danej akcji dotującej/motywującej, liczbę wdrożonych w tym czasie projektów oraz liczbę osób, które uzyskały tytuł Eksperta CP, a więc przeszły pełny cykl szkoleniowy i obroniły

Projekt CP. Dodano ponadto rubrykę, w której wskazano daty wprowadzenia nowych form honorowania firm przez przyznanie Świadectwa CP (od 1996 roku) oraz wpisu do PRCPiOP (od 2002 roku) [1] oraz uznania Świadectwa CP, jak również wpisu do PRCPiOP jako kryteriów jakościowych oceny projektów inwestycyjnych, zarówno w sektorze przemysłowym, jak i w usługach (od 2018 roku) rozporządzenie RM w sprawie pomocy publicznej udzielanej niektórym przedsiębiorcom na realizację nowych inwestycji (akt wykonawczy do ustawy z dnia 10 maja 2018 roku o wspieraniu nowych inwestycji) [13].

Tabela 17.2

Dotacje do ACP lub inne formy motywujące do udziału i liczba zrealizowanych Projektów CP w latach 1990–2023 wraz z efektem liczbowym: wdrożonych projektów i uzyskanych dyplomów eksperta [opracowanie własne na podstawie: Nowak 2000, Cichy 2022, Hordyńska 2023]

Dotacje/motywacja	Lata	Liczba Akademii	Liczba Projektów CP	Liczba Ekspertów CP	Forma certyfikacji
Dotacje rządu norweskiego	1990–1996	38 (Szkoly CP)	653	1299	Od 1996 – Świadectwo CP
Dotacje NFOŚiGW	1997–2000				
Dotacje NFOŚiGW	2001–2009	43	726	1446	Od 2002 – PRCPiOP
Akademie odpłatne	2010–2018	3	23	48	
Akademie odpłatne, ale również wprowadzenie punktu za Świadectwo CP lub wpisu w PRCPiOP przy staraniach o zwolnienia podatkowe na nowe inwestycje w strefach ekonomicznych ^{b)}	grudzień 2020 do październik 2022	8	23	63	Od 2018 – Świadectwo CP, jak również wpis do Polskiego Rejestru CP i OP, znalazły się wśród kryteriów jakościowych oceny projektów inwestycyjnych ^{a)}
Dotacje NFOŚiGW Punkt za Świadectwo CP lub wpis - jw. - nadal	2019–2023	3	43	73	

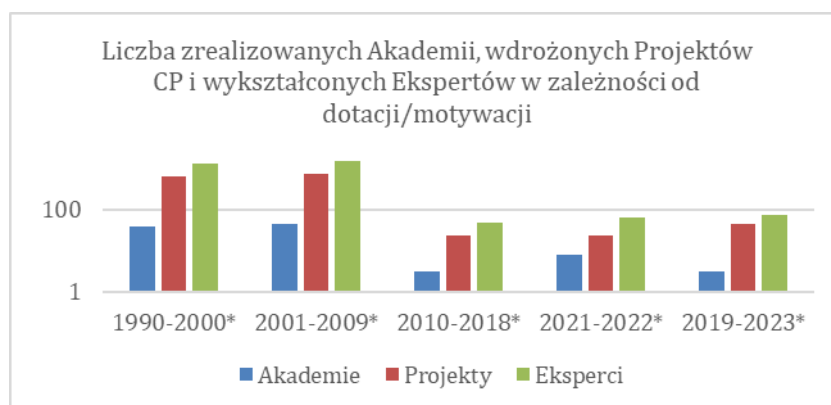
Legenda:

^{a)}<https://www.cp.org.pl/2015/08/swiadectwo-czystszej-produkcji.html>

^{b)}<https://www.cp.org.pl/p/rejestry.html>

Na rys. 17.1 zaprezentowano efekty liczbowe wszystkich Akademii dla zobrazowania spadku zainteresowania przedsiębiorstw udziałem w kursach przy braku dotacji oraz wyraźnym wzrostem zainteresowania w momencie, kiedy w 2018 roku Świadectwa Czystszej Produkcji znalazły się wśród kryteriów projakościowych oceny projektów inwestycyjnych. Ten wzrost jeszcze wyraźniej widać na rys. 17.2, gdzie efekty odniesiono do jednego roku realizacji Projektów CP. Na rys. 17.3 natomiast, gdzie liczbę wdrożonych projektów CP i liczbę Ekspertów, którzy uzyskali dyplom,

odniesiono do jednej Akademii w trakcie danej akcji dotującej/motywuującej, wyraźny wzrost zainteresowania uczestnictwem w Akademiach należy wiązać z uruchomieniem projektu edukacyjnego, w ramach którego sfinansowano trzy edycje Akademii (w województwach mazowieckim, dolnośląskim i śląskim). Liczba uczestników przerosła pierwotne szacowania realizatorów projektu i utworzono w każdej edycji dwie grupy uczestników.



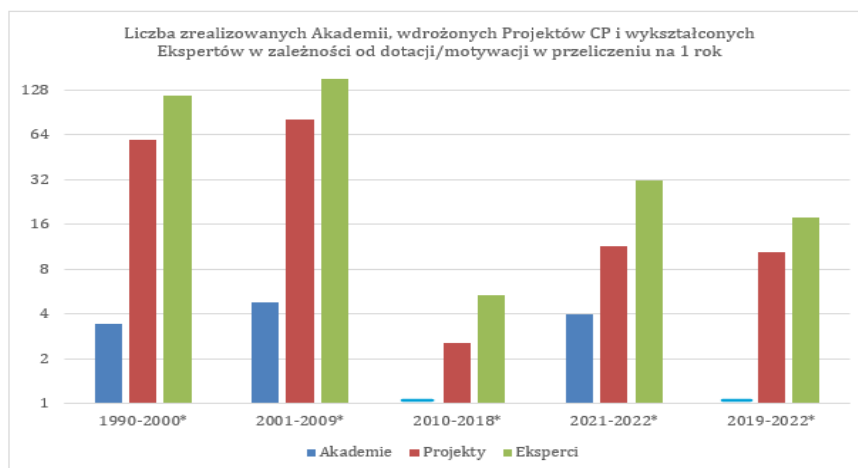
Legenda:

*1990–2000 – dotacje norweskie (11 lat), 2001–2009 – dotacje NFOŚiGW (9 lat), 2010–2018 – Akademie odpłatne (9 lat), 2021–2022 – Akademie odpłatne i punkt za Świadectwo lub wpis do Rejestru (2 lata), 2019-2023 – dotacje NFOŚiGW i punkt za Świadectwo lub wpis do Rejestru (4 lata)

Rys. 17.1. Akademie, Projekty i Dyplomy Eksperta CP (1990–2023) w trakcie danej akcji dotującej/motywuującej [źródło: opracowanie własne na podstawie: Nowak 2000, Cichy 2022]

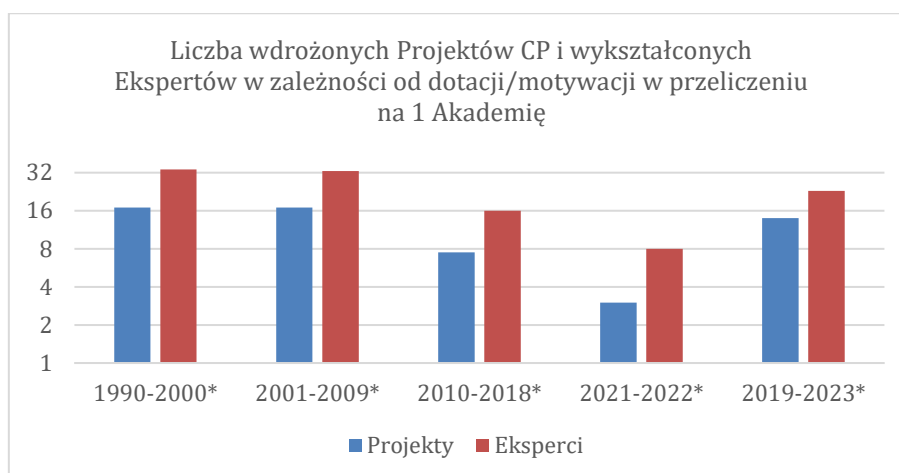
Fig. 17.1. Academies, Projects and CP Expert Diplomas (1990–2023) during a given subsidizing/motivating action [source: own study based on: Nowak 2000, Cichy 2022]

Akademie Czystszej Produkcji rozwijały się intensywnie w początkowych latach działalności Stowarzyszenia (38 Szkół CP), dzięki dużej dotacji rządu norweskiego (do 1996 roku), a następnie dzięki wsparciu ze strony NFOŚiGW, które ostatecznie zakończyło się w 2009 roku – zrealizowano wówczas 43 edycje ACP, wdrożono 726 Projektów CP oraz wykształcono prawie 1446 Ekspertów CP. Brak dofinansowania do kolejnych edycji Akademii wymusił rozpoczęcie, od 2010 roku, odpłatnych Akademii. Niestety, taka forma udziału w Akademii oraz dobrowolność, jeśli chodzi o wdrażanie SZŚ, stwarzały istotne bariery dla uczestników, w związku z czym w 2010–2018 zrealizowane zostały zaledwie 3 edycje Akademii, w ramach których wdrożono 23 projekty i tylko 48 osób uzyskało dyplomy Ekspertów CP (rys. 17.1 i 17.2).



Rys. 17.2. Akademie, Projekty i Dyplomy Eksperta CP (1990–2022) w przeliczeniu na rok trwania danej akcji dotującej/motywuującej [opracowanie własne na podstawie: Nowak 2000, Cichy 2022]

Fig. 17.2. Academies, Projects and Diplomas of a CP Expert (1990–2022) per year of duration of a given subsidizing/incentive action [own elaboration based on: Nowak 2000, Cichy 2022]



Legenda:

*1990-2000 – dotacje norweskie, 2001-2009 – dotacje NFOŚiGW, 2010-2018 – Akademie odpłatne, 2021–2022 – Akademie odpłatne i punkt za Świadectwo lub wpis do Rejestru, 2019-2023 – dotacje NFOŚiGW i punkt za Świadectwo lub wpis do Rejestru

Rys. 17.3. Projekty i Dyplomy Eksperta CP (1990–2023) w przeliczeniu na jedną Akademię CP w trakcie trwania danej akcji dotującej/motywuującej [opracowanie własne na podstawie: Nowak 2000, Cichy 2022]

Fig. 17.3. Projects and Diplomas of a CP Expert (1990–2023) per one CP Academy during the duration of a given grant/incentive action [own study based on: Nowak 2000, Cichy 2022]

Sytuację tę (bardzo mała liczba Akademii CP w latach 2020–2018) w znacznym stopniu poprawiło wprowadzenie punktu za Świadectwo CP lub wpis w PRCPiOP, przy staraniach o zwolnienia podatkowe na nowe inwestycje w strefach ekonomicznych. Dzięki temu zaledwie w półtora roku – od grudnia 2020 do października 2022 – zrealizowano 8 edycji tzw. indywidualnych ACP, realizowanych w bardzo intensywnym tempie (ok. 2 miesiące) dla bardzo małych grup (od jednej, do

pięciu firm), w ramach których zrealizowano 23 projekty a 63 osoby uzyskały dyplomy Ekspertów CP, czyli w tak krótkim czasie osiągnięto efekt porównywalny (a nawet lepszy) z dekadą realizacji działań bez wsparcia w postaci dodatkowych korzyści dla firm (rys. 17.2). To efekt zmian w podejściu do kwestii ekologicznych w firmach, na które mają wpływ również konsumenci, ale przede wszystkim zmiany legislacyjne (Mapa drogowa transformacji w kierunku GOZ, Europejski Zielony Ład). Proces transformacji w kierunku zrównoważonego rozwoju przyspieszył. Świadczą o tym chociażby wskaźniki monitorowane za pomocą Indeksu SDG (Sustainable Development Goals – „Indeks celów zrównoważonego rozwoju”). Wartość globalna Indeksu SDG dla Polski poprawiła się na przestrzeni lat 2016–2022 o 10,7 punktu: z 69,9 na 80,5 na 100 możliwych. Tym samym, jeśli chodzi o realizację założeń Agendy 2030, Polska od 2016 do 2022 roku awansowała w podsumowaniach z pozycji 38. (na 149 krajów), na miejsce 15. (na 195 krajów) [14].

17.3. Efekt projektu – baza dobrych praktyk

Najbardziej spektakularnym efektem projektu edukacyjnego jest baza dobrych praktyk. Bazę stanowi opis 90 przykładów dobrych praktyk i inwestycji zgodnych z zasadami CP, zrealizowanych przez uczestników Ruchu CP (w tym m.in. wybranych projektów opracowanych w ramach ACP, przeprowadzonych w projekcie edukacyjnym). Dla ułatwienia weryfikacji przykładów, dobre praktyki skatalogowano wg kategorii: zasoby, zanieczyszczenia, branża, wielkość firmy i koszty. Dla 50 praktyk pochodzących z mikro-, małych i średnich przedsiębiorstw – MMŚP – opracowano także wersje angielskie, które zostały zebrane na stronie [www.anglojęzycznej Stowarzyszenia](http://www.anglojęzycznej.stowarzyszenia.pl), a także zostały zaproponowane do opublikowania w bazie dobrych praktyk sieci EREK (European Resource Efficiency Knowledge Centre – Inicjatywa Komisji Europejskiej wpierająca efektywność zasobową w europejskich MMŚP, której członkiem jest Stowarzyszenie). 75 wybranych praktyk zebrano także w jednej, zwartej publikacji, która została wydana w wersji elektronicznej, w pliku pdf [1].

W tabeli 17.3 zestawiono dobre praktyki, wdrożone zupełnie bezkosztowo (low hanging fruits) i wysokonakładowe, zakwalifikowane tak ze względu na nakłady finansowe, jakie poniosły przedsiębiorstwa na ich wdrożenie. Zerowy wkład finansowy wykazało 14 firm, zaoszczędziły w ten sposób milion złotych w ciągu roku. Oczywiście wysokie nakłady inwestycyjne (15 firm) to oszczędność ponad

11 milionów złotych, ale zestawienie sporządzono przede wszystkim dla zobrazowania jaka jest skala oszczędności możliwych do uzyskania przez zmiany organizacyjne i racjonalizatorskie, usprawnienie procesów, wymianę komponentów, redukcję zużycia surowców/materiałów i odzysk materiałów, usprawnienie segregacji, redukcję opakowań, uzyskanie statusu produktu ubocznego, zmianę procedur i akcje edukacyjno-motywacyjne, czyli bezkosztowo, co powinno być zachętą dla firm do realizacji zmian, nawet jeśli nie dysponują środkami finansowymi na inwestycje prośrodowiskowe. Intensywność działań w firmach w tym zakresie nie jest jednakowa, najbardziej aktywne są te firmy, gdzie wyraźne jest zaangażowanie kierownictwa, głównie przez uczestnictwo w Akademiach oraz stopniowe delegowanie do uczestnictwa w Akademiach pracowników poszczególnych działów firmy.

Tabela 17.3

Efekty finansowe dobrych praktyk CP bezkosztowych i tych wysokonakładowych
[opracowanie własne na podst.: <https://www.cp.org.pl/2020/05/wyszukiwarka-dobrych-praktyk-cp.html>]

Dobre praktyki (90)	Bezkosztowe	Wysokonakładowe
Liczba razem	14	15
Oszczędności ogółem/rok [zł]	984 447	11 139 967
Średni okres zwrotu dla inwestycji wysokonakładowych:		3 lata i 4 miesiące

17.4. Podsumowanie

Chęć przystąpienia do Akademii CP i powodzenie realizacji wdrożenia proekologicznego, co będzie stanowić pierwszy krok do realizacji założeń Agendy 2020 w kierunku spełnienia wszystkich 17 celów zrównoważonego rozwoju przez każdą organizację, warunkują następujące elementy:

1. **Wysoka świadomość i zaangażowanie kierownictwa (lub przynajmniej poparcie działań)**, jeśli chodzi o zmiany na rynku w zakresie transformacji w kierunku zrównoważonego rozwoju. Zaangażowanie kierownictwa wynika bezpośrednio z normy PN-ISO 14001:2015 [15], jak również jest pierwszym i podstawowym etapem fazy planowania i organizacji podczas budowania podstaw przyszłego systemu zarządzania środowiskiem wg Czystszej Produkcji [2], a ostatecznie będzie stanowić o „być lub nie być na rynku”. Dla kierownictwa świadomego transformacji ekologicznej, z jaką mamy do czynienia na świecie w XXI w., uczestnictwo w Akademii CP jest okazją do proaktywnego zaangażowania

w proces zmian w kierunku Europy zeroemisyjnej. W europejskim prawie o klimacie zapisano obowiązkowy cel klimatyczny, którym jest ograniczenie emisji w UE o co najmniej 55% do 2030 roku, a do 2050 roku pełna transformacja UE w kierunku neutralnej dla klimatu [16]. Spełnienie tego najważniejszego warunku w postaci „zaangażowania kierownictwa” stanowi pierwszy krok do dalszych etapów realizacji procesu wdrażania strategii Czystszej Produkcji.

2. Możliwość sfinansowania udziału w Akademii Czystszej Produkcji lub bezpłatnego uczestnictwa w szkoleniu. Jest to szczególnie istotne dla mikro- i małych, ale także średnich przedsiębiorstw, które często mają bardzo ograniczone fundusze, a to najczęściej właśnie małe przedsiębiorstwa nie radzą sobie z kwestiami ekologicznymi, spychając je na dalszy plan działalności i ograniczając się jedynie do spełniania wymogów prawnych (czyli działań minimum) – bilans nakładów i zysków firm wzorcowych w bazie dobrych praktyk będzie przykładem dla innych, jakich korzyści mogą się spodziewać i w jakim czasie, co z pewnością wpłynie na decyzje dotyczące finansowania tego obszaru działalności szkoleniowej pracowników (coraz większa popularność Akademii indywidualnych potwierdza, że te korzyści są już wyraźnie dostrzegane).

3. Dążenie do pozyskania dodatkowych punktów za Świadectwo CP lub wpis w PRCPiOP przy staraniach o zwolnienia podatkowe na nowe inwestycje w strefach ekonomicznych, ulgi podatkowe, punkty przy przyznawaniu funduszy na inwestycje proekologiczne – to kryteria silnie motywujące do podejmowania aktywności w tym kierunku, ale pod warunkiem stworzenia firmom (szczególnie tym mniejszym i średnim) możliwości finansowania inwestycji. W 2005 roku Bank Ochrony Środowiska oferował preferencyjne kredyty na projekty Czystszej Produkcji, co byłoby warte kontynuowania.

4. Kontynuacja podjętych działań zgodnie z cyklem PDCA, związana z corocznym raportowaniem przez firmy CP, co wymaga utworzenia w firmie zespołu ds. CP, który koordynowany przez kierownictwo będzie miał przedstawicieli w każdym oddziale firmy. Taka struktura warunkuje bezkolizyjną komunikację na wszystkich szczeblach organizacji i realizację strategii CP w każdym aspekcie funkcjonowania firmy. Przykłady takich struktur prezentują wzorcowe firmy Czystszej Produkcji, prezentując ściśle związek pomiędzy aspektami organizacyjnymi, ekonomicznymi a ekologicznymi [17, 18].

5. Motywowanie pracowników do podejmowania działań w zakresie redukcji marnotrawstw przez system gratyfikacji zaangażowania. Takie podejście przekłada się na osiągnięcie wyraźnych i przede wszystkim mierzalnych efektów społecznych

i związaną z tym poprawę wizerunku firmy i prestiż. Firmy czują się doceniane przez wyróżnienie i nadzór nad działaniami wysokich rangą przedstawicieli jednostek i instytucji (np. NFOŚ, Ministerstwo Środowiska i Klimatu) i możliwość zaprezentowania swoich osiągnięć na forum krajowym i międzynarodowym (bazy dobrych praktyk, np. krajowa – baza dobrych praktyk i inwestycji Czystszej Produkcji czy międzynarodowa baza dobrych praktyk EREK).

6. Obligatoryjne dążenie do spełniania przez firmę wymagań prawnych. Jest to warunek bezwzględny spełniania tzw. minimum wymagań w stosunku do środowiska naturalnego. Zakładając, że wymagania prawne są spełnione, to nawiązując do normy PN-ISO 14001:2015, można w niej znaleźć wskazania dotyczące aktywności w podejmowaniu dobrowolnych działań na rzecz zrównoważonego rozwoju i odpowiedzialności społecznej, zmiany myślenia na zgodny z cyklem życia produktu i stosowania wskaźników efektywności środowiskowej w ciągłym doskonaleniu. Spełnianie takich właśnie nieobligatoryjnych wymagań jest odpowiedzią na oczekiwania klienta i koniecznością w kwestii współczesnych wyzwań wizerunkowych przedsiębiorstw w perspektywie zmian w kierunku Europejskiego Zielonego Ładu [15].

Niniejszy przegląd osiągnięć Przedsiębiorstw Czystszej Produkcji jest kolejnym etapem pogłębionej analizy efektów projektu edukacyjnego, której jednym z celów jest przygotowanie benchmarku funkcjonalnego dla firm rozważających ścieżkę wdrażania strategii Czystszej Produkcji na swojej drodze do zeroemisyjności [10].

Podziękowania

Projekt realizowany przez Stowarzyszenie Polski Ruch Czystszej Produkcji w latach 2019–2023, z dofinansowaniem Narodowego Funduszu Ochrony Środowiska i Gospodarki Wodnej, w ramach programu priorytetowego Edukacja Ekologiczna.

Bibliografia

1. <https://www.cp.org.pl/>, (dostęp 19.12.2022).
2. Nowak Z. (red.): Czysta Produkcja. Strategia ochrony środowiska XXI wieku, Stowarzyszenie Polski Ruch Czystszej Produkcji, Katowice 2000, 25–32.

3. Cichy M.J.: Czystsza Produkcja i jej model fenomenologiczny, Wyd. Pol. Śl., Gliwice 2007, 105–126.
4. Cichy M.J., Szafraniec M.: Ekoinnowacyjność przedsiębiorstw CP w Polsce. Część 1, ZN Pol. Śl., Seria: Organizacja i Zarządzanie, z. 77/2015, 19–37.
5. Malinowski Z., Hordyńska M.: Ocena efektywności środowiskowej przedsiębiorstwa FERRUM SA, Hutnik. R. 87/2020 nr 5, 141–146, bibliogr. 9 poz. DOI: 10.15199/24.2020.5.4.
6. Bachorz M., Hordyńska M.: Gospodarka Obiegu Zamkniętego – co oznacza dla nas jako producentów i konsumentów? Stowarzyszenie Polski Ruch Czystszej Produkcji. 2019.
7. Hordyńska M., Wasilewski M.: Czystsza Produkcja i EMAS – jak doskonalić ochronę środowiska w firmie? Stowarzyszenie Polski Ruch Czystszej Produkcji, 2021.
8. Cichy M.J.: Czystsza Produkcja – praktyka i edukacja. Projekt #KampaniaGOZ, Yearbook. UN Global Compact Network Poland 2022, 209.
9. Hordyńska M.: Czystsza produkcja – praktyka i edukacja, Aura, 12/2022, 5–6.
10. Hordyńska M.: Przedsiębiorstwo wzorcowe czystszej produkcji – dobre praktyki jako efekt kampanii edukacyjnej, [w:] Inżynieria zarządzania: Cyfryzacja produkcji. Aktualności badawcze 5/Knosala R. (red.), Warszawa, Polskie Wydawnictwo Ekonomiczne 2023, 751–759, ISBN 978-83-208-2561-9.
11. Kulczycka (red.): Wskaźniki monitorowania gospodarki o obiegu zamkniętym, Kraków, 2020, 138, 149. Wydawnictwo IGSMiE PAN, ISBN 978-83-956380-7-7, ISBN 978-83-956380-8-4 (wersja online) (dostęp: 12.12.2021).
12. Mohamoumgonbadi A., Genovese A., Sgalambro A.: Closed-loop supply chain design for the transition towards a circular economy: A systematic literature review of methods, applications and current gaps. *Journal of Cleaner Production* 2022, 323 (2–3), 129101 DOI: 10.1016/j.jclepro.2021.129101.
13. Ustawa z dnia 10 maja 2018 r. o wspieraniu nowych inwestycji, Dz.U. 2018, poz. 1162, <https://isap.sejm.gov.pl> (dostęp: 12.06.2023).
14. <https://kampania17celow.pl/agenda-2030/>, (dostęp: 30.12.2022).
15. Seroka-Stolka O.: Przywództwo w dążeniu do doskonałości w zarządzaniu środowiskowym - nowelizacja normy PN-ISO 14001:2015, *Zarządzanie Jakością*, nr 2–3 (44–45), 2016, 12–17 (PDF) <https://www.researchgate.net/publication/319078897>, (dostęp: 9.01.2023).
16. <https://www.consilium.europa.eu/pl/policies/green-deal/fit-for-55-the-eu-plan-for-a-green-transition/>, (dostęp: 20.12.2022).
17. Popek S., Popek A.: Program CP jako strategia zarządzania organizacją i jej zastosowanie w realizacji idei zrównoważonego rozwoju. *Współczesne Problemy Zarządzania*, Vol. 8, N. 2 (17), 2020, 33–46, DOI: <https://doi.org/10.52934/wpz.121>.
18. CP i Ekozarządzanie nr 1/2017, <https://www.cp.org.pl/p/cpiez.html>, (dostęp: 20.12.2022).

18. MICROPLASTICS IN INDOOR

18.1. Introduction

At the beginning of the 1980s, there was already discussion of the accumulation of small plastic pellets and granules in the environment [1]. In 2004, Thompson et al. [2] used the term "microplastics" (MPs) for the first time. The MPs were further described and defined in 2019 by Frias and Nash as synthetic solid particles or polymeric matrices, with regular or irregular shapes and sizes ranging from 1 mm to 5 mm, of primary or secondary manufacturing origin, which are insoluble in water [3].

MPs have become an emerging pollutant of increasing global concern due to their ubiquitous detection in environmental compartments ranging from water, sediment, soil, biota, and recently in air [4]. While small individually, it is estimated that MPs may contribute to as much as 13.2% of the total mass of global plastic pollutants in the environment by 2060 [5]. To date, most of the research on MPs has focused on MPs in aquatic and terrestrial ecosystems, and much less is known about MPs in the atmospheric environment. Airborne MPs (AMPs) have been identified both indoors [6, 7] and outdoors [8, 9].

18.2. Sources of microplastic in indoor

The location, use, purpose, and furnishings of an indoor space all have an impact on the amount of MP pollutants that are present there. MPs are divided into two groups according to the nature of the facility that released them into the environment: primary and secondary. Primary MPs are directly released from the source, like fabrics, cosmetics, etc. Whereas secondary sources of MPs are weathering-related products, i.e., those made by the likes of erosion, abrasion, corrosion, photo-oxidation (chemical), and biological transformation [10]. MPs levels were found to be significantly higher in some indoor air and dust samples compared to outdoor samples

[11]. Hence, some prompt actions need to be taken as there are several direct and indirect causes and consequences of plastics and their additives in the indoor environment (Fig. 18.1), which can be toys, personal care products, laundry, printing, paints, and furniture.

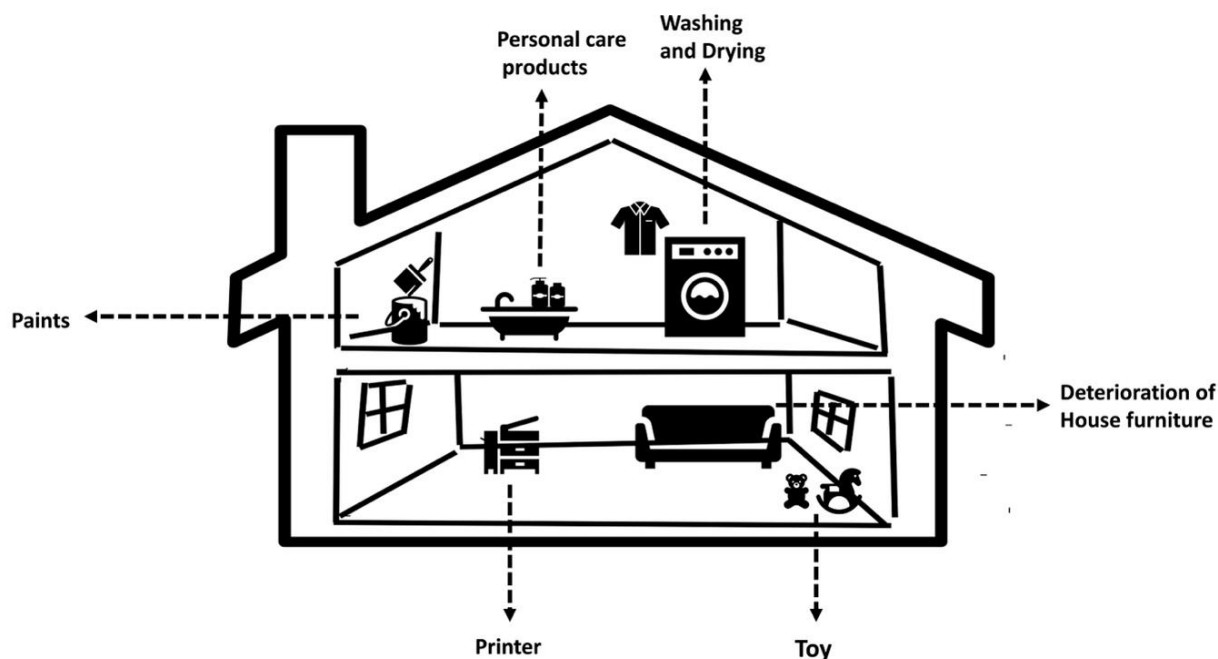


Fig. 18.1. Source of indoor Microplastic

Rys. 18.1. Źródła emisji mikroplastiku w pomieszczeniach

The location, use, purpose, and furnishings of an indoor space have an impact on the source and concentration of MPs in an indoor environment. Table 18.1 compiles the results of several studies that measured MPs concentrations in indoor environmental samples taken from different locations. It is hard to compare results due to the inconsistent methods and testing procedures used. This issue needs to be addressed urgently because there are currently no established protocols or standards for MPs analysis.

Bahrina et al. found that the MPs present indoors in the city of Surabaya, Indonesia, were predominantly fibre-shaped, and MPs particles were identified as containing mostly plastic polymers. Moreover, they identified a direct relationship between the number of occupants and the concentration of MPs. The daily indoor activities and the use of plastic products will inevitably lead to the release of MPs that settle in the indoor dust [12]. The study by Zhai et al. also concludes that the frequency of human activities is one of the main factors leading to changes in the content of MPs in indoor air, and turbulence caused by airflow will lead to the migration of MPs in the

indoor environment [13]. They tracked MPs deposition in various indoor environments, such as offices, laboratories, dining halls, and dormitories. Results showed that the average MPs abundance in the dormitory was the highest (14088.05 pcs/m³), followed by in the office (13097.13 pcs/m³), laboratory (7512.55 pcs/m³), and dining hall (4308.26 pcs/m³). The MPs deposited in indoor environments were mostly dark, elongated, and solid [13].

Table 18.1

Concentrations of microplastics in the indoor

Sampling site		Concentration	Reference
Surabaya, Indonesia	school	290–321 MPs on a weekday 239–257 MPs on a weekend	[12]
	office	334–351 MPs on a weekday 242–252 MPs on a weekend	
	apartment	108–133 MPs on a weekday 95–127 MPs on a weekend	
Xiamen, China	dormitory	14088.05 pcs/m ³	[13]
	office	13097.13 pcs/m ³	
	laboratory	7512.55 pcs/m ³	
	dining hall	4308.26 pcs/m ³	
New Jersey, US	single-family house	1.96×10 ⁴ fibers/m ² /day	[14]
	classroom	6.20×10 ³ fibers/m ² /day	
Paris, France	apartments	1.1–18.2 fibers/m ³	[6]
	office	4.0–59.4 fibers/m ³	
Shiraz, Iran	school	195 MPs /g settled dust	[15]
Zhejiang, China	residential apartments	1174 MPs/g dust	[16]
	offices	896 MPs/g dust	
	business hotels	843 MPs/g dust	
	university dormitories	775 MPs/g dust	
	university classrooms	209 MPs/g dust	

A total of three locations in the city of Paris, including two apartments and one office, were investigated by Dris R. et al. for the presence of MPs in the indoor air. Both indoor and outdoor air monitoring was conducted on different days and seasons. The results show that the concentration of microfibers in the interior air was between

1.1 fibers/m³ and 59.4 fibers/m³, which is much greater than the concentration of 0.3 fibers/m³ to 1.5 fibers/m³ found in outdoor air [6].

The study explored by Yao et.al. in the indoor environments in New Jersey, United States, identified that the deposition rates of synthetic fibers were highest in the single-family house and lowest in the classroom, suggesting that residential houses are a major source of MP fibers [14]. However, a high deposition rate of film-like plastics was observed in the classroom, whereas the lowest deposition rate was found in the hallway. The deposition rate of MPs in the ambient air acquired on a building roof was only about 2–8% of the indoor deposition rates [14].

Abbasi and Turner, did a comparative study of MPs in dry and wet weather and investigated the atmospheric deposition of MPs at two sites in Iran. The study found that monthly deposition was greater at an urban centre than at a remote, elevated location. They identified a higher deposition of MPs during drier and warmer months [18]. Zhu J. et al. [16] identified high MPs abundance in various indoor environments, like residential and commercial buildings. They found that indoor dust samples from residential apartments had the highest abundance of MPs. Fiber was the predominant shape of MPs in most indoor dust samples. The main MP polymer in indoor dust samples from business hotels, university dormitories, and residential apartments was polyester, whereas those from offices and universities were polyethylene (PE) and polypropylene (PP). They also calculated the estimated daily intake of MPs through indoor dust intake.

18.3. Methodology for assessing microplastics

Although several studies used different sampling techniques for airborne MPs, their main goal was to generate a sample that accurately reflected the amount of concentration in the environment.

With regard to the related matrix, various sample approaches were used to undertake indoor air sampling. The floors of bedrooms and living rooms were sampled for indoor deposited particles using the pan and brush method [17] and vacuum cleaning [6]. A filter was used for indoor suspended dust sampling. To accurately assess human exposure to MPs, a suspended indoor air sampler was placed at different heights, including those that were comparable to the typical breathing height of an individual (1.2 m) [6].

18.3.1. Sample preparation

In order to provide analytical data on the features and concentration levels of MPs present in related environmental matrices, samples were prepared for analysis after sample collection. Dust from both indoor and outdoor environments is often sieved to the standard particle size (about 5 mm) after first being air dried. In order to depict an ambiguous size-based definition of MPs, which is known to comprise plastic particles up to 5 mm, a 5-mm sieve is usually used.

Two methods were employed to create MPs from suspended dust that was gathered using filtration equipment. The most popular method entailed doing away with the traditional sample preparation techniques of digestion, sifting, and air drying.

18.4. Microplastics detection and identification

It is possible to determine the chemical and physical properties of MPs using any one of a number of different methods of analysis. For analysing house dust and air in an indoor environment, a few additional techniques are required (Fig. 18.2). Even though there is not a widely accepted method for identifying MPs, there are a number of analytical techniques for MPs that have been used based on their features.

18.4.1. Morphological analysis

MPs can be identified based on their physical properties, such as elasticity, hardness, colour, shininess, and structure. These characteristics are identified in conjunction with visual or optical microscopy techniques. Binocular microscopy, polarised light microscopy (PLM), and fluorescence microscopy are all types of microscopy that can be used to determine the presence of MPs in samples of indoor dust. To analyse MPs, a fluorescence microscope is coupled with a UV filter of varying wavelengths. Using its inherently fluorescent properties, which are occasionally added as colouring agents during plastic production, it detects MPs. Contrarily, the PLM method has been successfully applied to MPs analysis, particularly in the realm of colour analysis [18]. When rotated under the PLM, polarising light analyses MPs in environmental samples. The advantage of this technique is its inexpensive and fast detection method. Physical characterization techniques are typically a prerequisite for chemical analytical techniques. This is due

to the fact that MPs isolated from diverse environmental matrices may contain other materials, such as paper, wood, and plant matter, that share similar properties with MPs. To avoid overestimation, misestimation, and underestimation of MPs particles, chemical analysis based on particle composition is necessary.

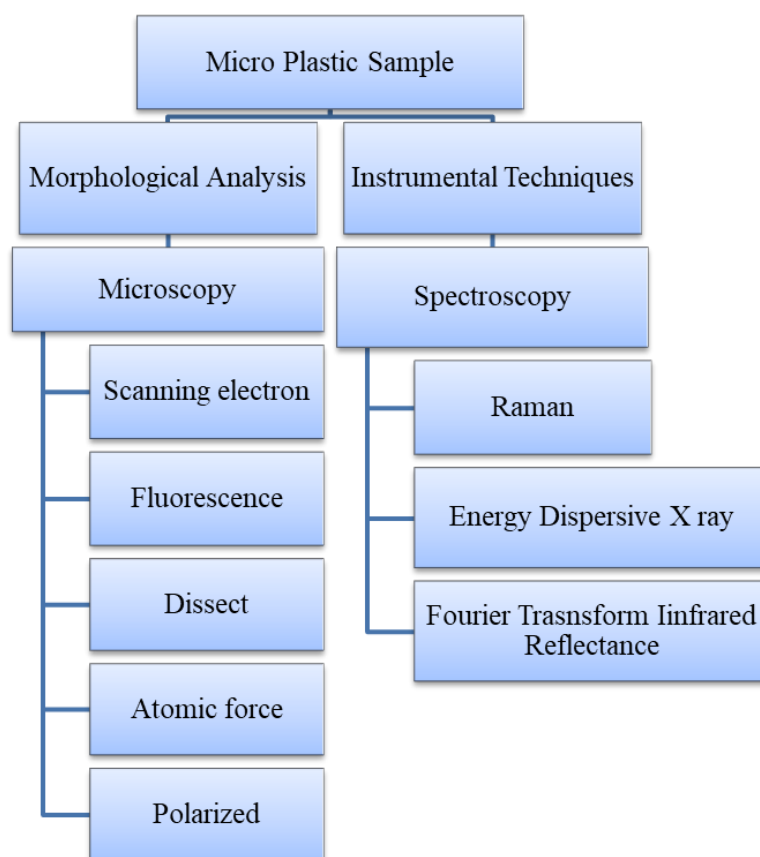


Fig. 18.2. Analytical methods of MPs

Rys. 18.2. Metody oznaczania MPs

Scanning Electron Microscope (SEM) is a widely used method for detecting MPs based on the morphological characteristics and elemental composition of plastics. Surface topography analysis is used to extract morphological properties by placing the sample to be studied on a cylindrical SEM stub. The advantage of the SEM method is that it can reveal the MPs degradation patterns (grooves, flakes, pits, adhering particles, and fractures).

18.4.2. Analytical instrumental techniques

Characterising MPs on the basis of their chemical composition is a crucial step in distinguishing plastic from other particles.

Chromatography has long been the standard way to find out what kinds of organic compounds are in a sample. Thermal desorption gas chromatography/mass spectrometry is a common way to find out about MPs compounds, especially volatile substances. For substances with less volatility, traditional extraction methods with analysis by GC/MS or liquid chromatography (HPLC-MS/MS) work well. PET detection using in-matrix depolymerization and LC-UV has been proposed by [19]. MPs made of polycarbonate (PC) and polyethylene terephthalate (PET) were tested using LC-MS/MS [20].

For the analysis of MPs in environmental samples, Fourier transform infrared (FTIR) spectroscopy is a popular and extensively used technique. Most molecules absorb light in the infrared region of the electromagnetic spectrum, and FTIR is very accurate at identifying the type of polymer by providing specific infrared spectra with distinct band patterns; it can also distinguish between synthetic and natural materials. Pyrolysis gas chromatography is a method that thermally breaks down big molecules in a vacuum or an inert atmosphere. Characterising MPs frequently involves using Raman spectrum imaging. Although the spectra that IR and Raman offer are similar, the two techniques are either additional or complementary.

18.5. Ways of reducing microplastics from the indoor

Despite the fact that airborne MPs are a novel topic on which only a small number of studies have been conducted, more research is needed. Some urgent mitigation actions might be implemented to limit the danger of human exposure to this pollutant before the topic can be adequately studied and understood [21]. There are currently two methods available to reduce the presence of MPs in the interior environment: indirect and direct. The indirect method entails the installation of appropriate filtration in new or existing ventilation or air conditioning systems serving public spaces, such as offices, or the use of air purifiers in private residences that do not have or use air conditioning systems infrequently. Eliminating potential sources of MPs is the most straightforward approach. Both approaches are intricate and frequently challenging to use.

The present ventilation and air conditioning systems may not have enough room in the indirect technique to install the appropriate filters. It is possible that the current fans cannot generate enough static pressure to overcome the resistance of the new filters. The systems with new filters may be too expensive to maintain and operate.

The direct method is even more challenging to implement. It is a long-term solution requiring public education and awareness of the MP issue, as well as a willingness to deny their sources. In order to decrease and ideally eliminate the usage of all plastics, the industrial sector must also look into other sources of materials.

Both approaches have advantages and disadvantages and would be unnecessary if we could develop a mechanism to safely disintegrate plastics or use biodegradable materials in place of bio-resistant polymers [22].

18.6. Risks of microplastics

Humans can be exposed to MPs through ingestion, inhalation, and dermal contact. Among these, the greatest exposure occurs through inhalation and ingestion [23]. Inhalation is a continuous, life-long process where humans are exposed to a diverse mix of pollutants, including MPs [24].

Understanding the quality, of the air we breathe is of paramount importance, especially indoor air quality as most people spend 90% or more of their time indoors [25]. Despite the importance of indoor air quality, there has been relatively little research done on the quality of air where people spend most of their time, such as in our homes, schools, recreational and public buildings, offices, restaurants, or inside cars [26]. Hence, it is prudent to monitor indoor air quality and particularly indoor AMPs, as the inhaled MP particles can cause adverse health effects on the human respiratory system, such as oxidative stress [27], inflammation [28], and genotoxicity [11]. MPs have been detected in human lung cells [29], stools [30], body fluids [31], the placenta and breastmilk [32].

18.7. Conclusions

Due to their extensive prevalence in the environment, MPs are a global problem. MPs in the atmosphere have received limited study compared to aquatic and terrestrial ecosystems. Recent research found airborne MPs (AMPs) indoors and outdoors.

MPs pollution is a growing environmental concern, and studies have shown that levels indoors (in places like houses and businesses) can be much higher than outside. Differences can be attributed to individual factors, including lifestyle choices and

flooring materials. Synthetic fibres are present in the interior environment, but the particles are typically too big for human inhalation. The lack of established protocols or standards for MPs analysis poses a challenge when comparing results across studies. Different methodologies have been employed to assess MPs, including sampling techniques and sample preparation methods, as well as various analytical techniques used to detect and identify MPs based on their physical and chemical properties. However, they are not unified, and there are no standards for their determination so far. To mitigate the presence of MPs in indoor environments, both indirect and direct methods can be employed. The risks of MPs primarily arise from inhalation and ingestion. Monitoring indoor air quality, particularly indoor AMPs, is crucial, as prolonged exposure to MP particles can have adverse health effects on the respiratory system.

Overall, further research is needed to better understand the extent and impact of MPs pollution in various environments. Standardized protocols and increased awareness are necessary to effectively address this emerging global concern.

Bibliography

1. Gregory M.R.: Virgin plastic granules on some beaches of Eastern Canada and Bermuda. "Marine Environmental Research", Vol.10, 1983, p. 73–92.
2. Thompson R.C., Olsen Y., Mitchell, R.P., Davis A., Rowland S.J., John A.W.G., McGonigle D., Russell A.E.: Lost at Sea: Where Is All the Plastic? "Science", Vol. 304, 1979, p. 838–838.
3. Frias J.P.G.L., Nash R.: Microplastics: Finding a consensus on the definition. "Marine Pollution Bulletin", Vol. 138, 2019, p. 145–147.
4. Ageel H.K., Harrad S., Abdallah M.A.-E.: Occurrence, human exposure, and risk of microplastics in the indoor environment. "Environmental Science: Processes and Impacts", Vol. 24, 2022, p. 17-31.
5. Sharma S., Basu S., Shetti N.P., Nadagouda M.N., Aminabhavi T.M.: Microplastics in the environment: Occurrence, perils, and eradication. "Chemical Engineering Journal", Vol. 408, No.127317, 2021.
6. Dris R., Gasperi J., Mirande C., Mandin C., Guerrouache M., Langlois V., Tassin B.: A first overview of textile fibers, including microplastics, in indoor and outdoor environments. "Environmental Pollution", Vol. 221, 2017, p. 453–458.
7. Vianello A., Jensen R.L., Liu L., Vollertsen J.: Simulating human exposure to indoor airborne microplastics using a Breathing Thermal Manikin. "Scientific Reports", Vol. 9, No. 8670, 2019.
8. Allen S., Allen D., Phoenix V., Le Roux G., Jiménez P., Simonneau A., Binet S. Galop D.: Atmospheric transport and deposition of microplastics in a remote mountain catchment. "Nature Geoscience", Vol. 12, 2019, p. 339–344.

9. González-Pleiter M., Edo C., Aguilera Á., Viúdez-Moreiras D., Pulido-Reyes G., González-Toril E., Osuna S., De Diego-Castilla G., Leganés F., Fernández-Piñas F., Rosal R.: Occurrence and transport of microplastics sampled within and above the planetary boundary layer. “Science of the Total Environment”, Vol. 761, No. 143213, 2021.
10. Rillig M.C.: Microplastic in Terrestrial Ecosystems and the Soil? “Environmental Science Technology” Vol. 46, 2012, p. 6453–6454.
11. Gasperi J., Wright S.L., Dris R., Collard F., Mandin C., Guerrouache M., Langloiset V., Kelly F.J., Tassin B.: Microplastics in air: Are we breathing it in? “Current Opinion in Environmental Science & Health.” Vol. 1, p. 1–5.
12. Bahrina I., Syafei A.D., Satoto R., (...), Hermana J., Nasir M.: An occupant-based overview of microplastics in indoor environments in the city of Surabaya, Indonesia. “Journal of Ecological Engineering”, Vol. 21, 2020, p. 236–242.
13. Zhai X., Zheng H., Xu Y., Zhao R., Wang W., Guo H.: Characterization and quantification of microplastics in indoor environments. “Heliyon”, Vol. 9, No. e15901, 2023.
14. Yao Y., Glamoclija M., Murphy A., Gao Y.: Characterization of microplastics in indoor and ambient air in northern New Jersey. “Environmental Research”, Vol. 207, No. 112142, 2022.
15. Nematollahi M.J., Zarei F., Keshavarzi B., Zarei M., Moore F., Busquets R., Kelly F.J.: Microplastic occurrence in settled indoor dust in schools. “Science of the Total Environment”, Vol. 807, No. 150984, 2022.
16. Zhu J., Zhang X., Liao K., Wu P., Jin, H.: Microplastics in dust from different indoor environments. “Science of the Total Environment”, Vol. 833, No. 155256, 2022.
17. Liu C., Li J., Zhang Y., Wang L., Deng J., Gao Y., Yu L., Zhang J., Sun H.: Widespread distribution of PET and PC microplastics in dust in urban China and their estimated human exposure. “Environment International”, Vol. 128, 2019, p. 116–124.
18. Abbasi S., Turner A.: Dry and wet deposition of microplastics in a semi-arid region (Shiraz, Iran). “Science of the Total Environment”, Vol. 786, No. 147358, 2021.
19. Tian L., Skoczynska E., Siddhanti D., Van Putten R.J., Leslie H.A., Gruter G.J.M.: Quantification of polyethylene terephthalate microplastics and nanoplastics in sands, indoor dust and sludge using a simplified in-matrix depolymerization method. “Marine Pollution Bulletin”, Vol. 175, No. 113403, 2022.
20. Wang L., Zhang J., Hou S., Sun H.: A Simple Method for Quantifying Polycarbonate and Polyethylene Terephthalate Microplastics in Environmental Samples by Liquid Chromatography–Tandem Mass Spectrometry. “Environmental Science and Technology Letters”. Vol. 4, 2017, p. 530–534.
21. Facciola A., Visalli G., Ciarello M., Pietro Di. A.: Newly emerging airborne pollutants: current knowledge of health impact of micro and nanoplastics. “International Journal of Environmental Research and Public Health”. Vol. 18, No. 2997, 2021.
22. Kacprzak S., Tijging, L.D.: Microplastics in indoor environment: Sources, mitigation and fate. “Journal of Environmental Chemical Engineering”, Vol. 10, No. 107359, 2022.
23. Domenech J., Marcos R.: Pathways of human exposure to microplastics, and estimation of the total burden. “Current Research in Food Science”, Vol. 39, 2021, p. 144–151.
24. Prata J.C.: Airborne microplastics: Consequences to human health? “Environmental Pollution”, 234, 2018, p. 115–126.

25. Ouyang Z., Mao R., Hu E., Xiao C., Yang C. Guo X.: The indoor exposure of microplastics in different environments. "Gondwana Research", Vol. 108, 2022, p.193–199.
26. Air Quality: Indoor Air. Australian Government Department of Climate Change, Energy, the Environment and Water. [https://www.dcceew.gov.au/environment/protection/air-quality/indoor-air#:~:text=Poor%20indoor%20air%20quality%20can,year%20\(Brown%2C%201998](https://www.dcceew.gov.au/environment/protection/air-quality/indoor-air#:~:text=Poor%20indoor%20air%20quality%20can,year%20(Brown%2C%201998), accessed on 22 May 2023.
27. Jeon M.S., Kim J.W., Han Y.B., Jeong M.H., Kim H.R., Sik Kim H., Park Y.J. Chung K.H. Polystyrene microplastic particles induce autophagic cell death in BEAS-2B human bronchial epithelial cells. "Environmental Toxicology", 38, 2023, p. 359–367.
28. Dong C.D., Chen C.W., Chen Y.C., Chen H.H., Lee J.S., Lin C.H.: Polystyrene microplastic particles: In vitro pulmonary toxicity assessment. "The Journal of Hazardous Materials", Vol. 385, No. 121575, 2020.
29. Amato-Lourenco L.F., Carvalho-Oliveira R., Junior G.R., Dos Santos Galvao L., Ando R.A., Mauad T.: Presence of airborne microplastics in human lung tissue. "The Journal of Hazardous Materials", Vol. 416, No. 126124, 2021.
30. Zhang N., Li Y.B., He H.R., Zhang J.F., Ma G.S.: You are what you eat: Microplastics in the feces of young men living in Beijing. "Science of the Total Environment", Vol. 767, No. 144345, 2021.
31. Guan Q., Jiang J., Huang Y., Wang Q., Liu Z., (...), Wu D., Xia Y.: The landscape of micron-scale particles including microplastics in human enclosed body fluids. "The Journal of Hazardous Materials", Vol. 442, 2023, No. 130138.
32. Liu S., Lin G., Liu X., Yang R., Wang H., Sun Y., Chen B., Dong R.: Detection of various microplastics in placentas, meconium, infant feces, breastmilk and infant formula: A pilot prospective study. "Science of the Total Environment", Vol. 854, No. 158699, 2022.

19. REDEVELOPMENT/REUSE OF POSTINDUSTRIAL AREAS, CASES FROM PRACTICE

19.1. Introduction

Degraded postindustrial areas are usually called brownfields. This term defines sites that have been affected or their neighborhood has been affected by the former uses. Usually they are located in developed urban areas, are abandoned or underused and have real or perceived contamination problems. Not all brownfields are postindustrial, they could be also post-rural or they may be degraded urban areas that have lost their functions. Such areas require intervention to bring them back to beneficial use.

Progressive degradation may be affected by various reasons. The source could be a single devastated property in the middle of community, initially this one property reduces the value of the entire surrounding and initiates depopulation. More often it is a group of underused properties within the urban area with similar effects. The main problem can be the collapse of the local or regional industrial or service base. Depopulation leads to the neglect of infrastructure and, as a result, to the destruction of city districts. The brownfields problem may also result from devastation of land, as a consequence of economic or other activities, like deposition of various wastes, near which no one wants to live. All of this makes the problem of brownfields not just a problem of industrial collapse. There are also numerous real estate and social problems, they affect the whole surrounding community, deter investors, reduce business activities, as a consequence bring job reduction, decrease property values (not only devastated, but also surrounding), cause decrease of taxes, lower living standards, environmental standards. Young, mobile and well educated people are leaving, grows social inequity, cost of social services.

Effective redevelopment of brownfields is so important, because it affects not only the urban fabric, but also the community. It starts the process of activating the unproductive holes in the community, increases local employment, local economic activity (people can find work in the neighborhood, also in the reconstruction works), causes growth of public health and protection of local environment. The positive

example spreads and catalyzes the revitalization of the surrounding area. Finally, what is extremely important nowadays, revitalization of brownfields reduces development pressure on green areas (felling of forests etc).

The impact of brownfields is very wide, so the remedy must also be appropriate, therefore proposed solutions should be cross-institutional, cross-departmental and cross-professional. Brownfield reuse projects are more complex than ordinary one, they are also time consuming and more risky. They require sophisticated and multidisciplinary knowledge that can be assured by experienced consultants. Usually redevelopment process requires cooperation of consultants representing various branches, including: environmental and remediation consultants, real estate consultants, financial consultants, project managers, design consultants, technical, PR consultants and community and employment consultants. Additionally they should cooperate with owners, neighbors, other members of local interest groups, NGOs, sometimes representing extremely different point of view.

19.2. The role of construction engineer in the process of brownfields redevelopment

Construction engineer usually works in the group of technical and design consultants and is involved in various levels of development process – starting from the site investigation, through examination of the technical condition of structure, design and supervision of the execution.

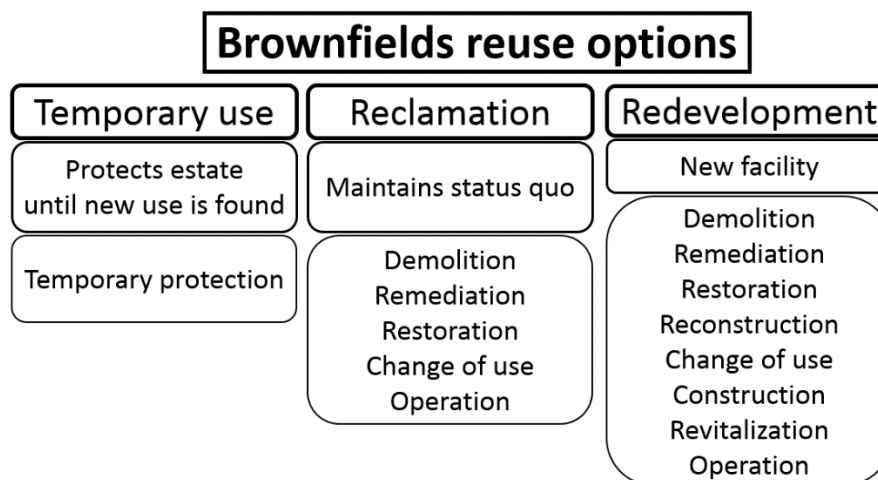


Fig. 19.1. Brownfields reuse options

Rys. 19.1. Możliwości ponownego wykorzystania terenów przemysłowych

There are three levels to reuse brownfields that may be recognized from the construction engineer's point of view. They are schematically shown in Figure 19.1. First level means low cost temporary use, until new function will be found. It usually requires little repair / renovation. The second level is the reclamation. In this case the current function is maintained, but a renovation is carried out. It includes demolition, remediation, restoration, some utility modifications and finally return to operation. The third, most radical level is the redevelopment. Almost new facility is erected in this case. Usually this level deeply interferes with the structure of the building, there are new constructions and revitalization of the surroundings.

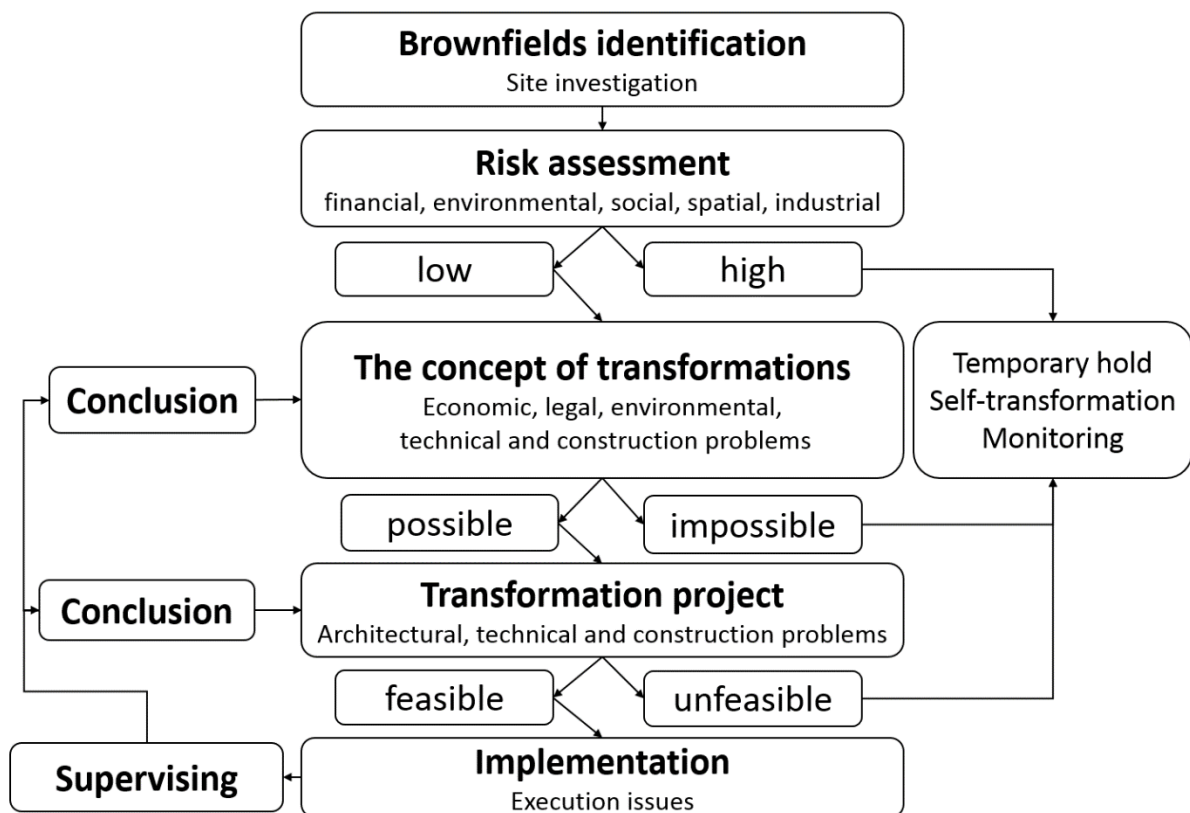


Fig. 19.2. Procedure of transformation process

Rys. 19.2. Schemat procesu transformacji

Figure 19.2 shows schematically the procedure of the transformation process. It usually begins with site investigation, the key and at the same time specific aspects of which are: contamination, build up ratio adapted to specific needs and processes, bankruptcy proceedings and complex ownership structure. Research often requires reaching for unusual sources, such as record kept by the entity (company, army unit) located in the area of planned revitalization, archives of state, communal, district or provincial offices and services and other sources of historical data. Information may also be collected directly by survey conducted among local residents, former workers

etc. For example, Figure 19.3 shows old maps and aerial pictures, taken by allied forces during II World War, used in the reclamation project Gdańsk Harbour.

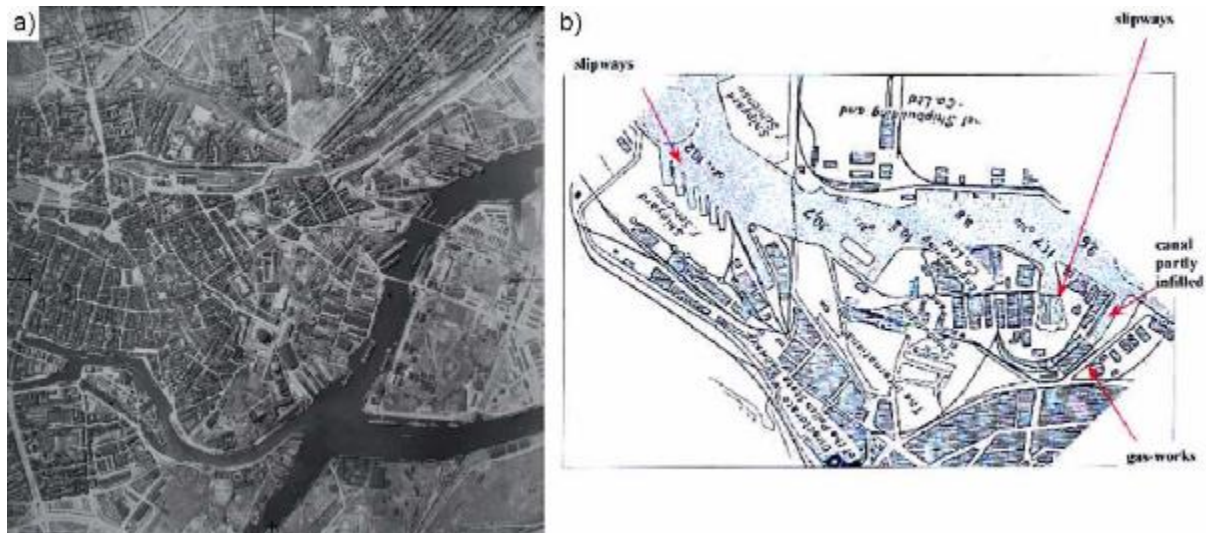


Fig. 19.3. Military maps used in the reclamation of Gdańsk Harbour [1]

Rys. 19.3. Mapy wojskowe wykorzystane w procesie rekultywacji Portu Gdańskiego [1]

The risks associated with brownfield reuse typically exceed the risks associated with greenfield development. They can be considered in legal, financial, health and technical aspects. In addition, the risk for individual participants of the revitalization process may be different. Table 19.1 illustrates the threats to the main stakeholder groups.

Table 19.1

The mayor risks for stakeholders of brownfields revitalization process [2]

Stakeholder	Type of risk			
	Legal	Financial	Health	Technical
Investor	X	X		
Developer	X	X	X	X
Lawyer	X	X		
Property consultant	X	X		X
Environmental consultant	X	X	X	X
Design consultant	X	X	X	X
Local government	X	X		
Public (community)			X	

Reliable estimation of the environmental hazards of the facility helps to reduce unplanned reclamation costs, thus increasing the chances of project success. The key to reducing the risk associated with revitalization projects is the experience of the

developer and the project team. Even preliminary research conducted in an incompetent manner may result in incomplete, incorrect recommendations, and can cause secondary hazards (e.g. sampling by drilling through aquifers may result in the spread of pollutants).

The most important component of the threat to the environment is the threat to health, defined as the qualitative and quantitative health effects caused to humans by the action of harmful factors. Health risk assessment may include identification and selection of indicators of chemical compounds, assessment of human exposure to danger, assessment of the toxicity of chemical substances (carcinogenic and non-carcinogenic).

Typically, the more polluted, the higher the remediation costs, and this limits land use only when the market can afford it or when a public subsidy is available to cover it.

The tasks of construction engineer are mainly related to technical risks. They most often occur in the case of demolition of existing buildings in degraded areas, construction of new ones, or when existing buildings require adaptation and adaptation to a different function. Technical problems occur less often when the reclamation of a degraded area consists in planting trees or sodding.

When restoring a degraded area to use entails technical problems, the civil engineer plays a significant role during all stages of the revitalization process.

19.3. Reuse potential of existing structures

Not every building can be revitalized in a simple way. At the stage of developing the concept of revitalization methods, the construction engineer performs an inspection of the existing facilities in order to determine their technical condition and the possibility of further use (preparation of an expert opinion). In the next stage, in consultation with the investor, the engineer documents the verification of the concept in terms of technical feasibility of their implementation and prepares a preliminary cost estimate of the planned works in order to compare different concepts in economic terms.

In terms of suitability for reuse three groups of building structures can be identified: least, medium and most susceptible (Fig. 19.4). Within the first group are structures practically impossible to be converted, they should maintain primary function (the best example of this group is chimney). Large and high multi-storey

monolithic buildings are also difficult to convert, usually they are not energy efficient and expensive in utilization. The easiest is the reuse of the most popular small buildings, office and institutional facilities.

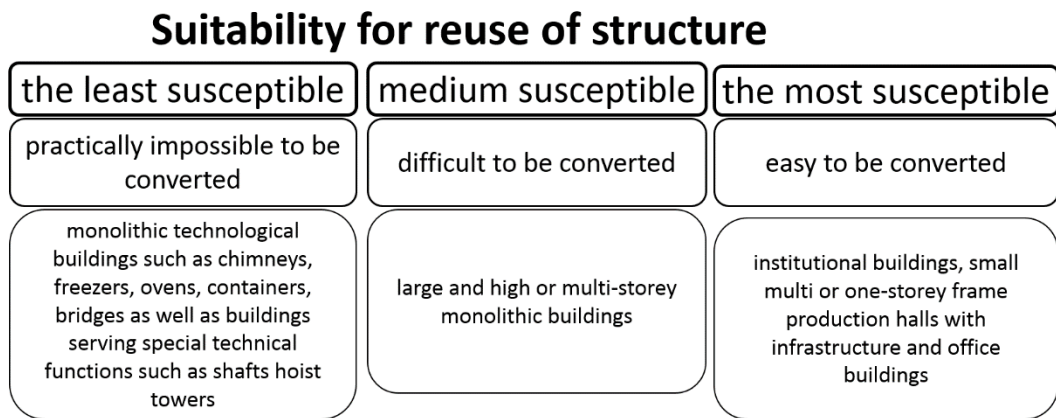


Fig. 19.4. Reuse potential of existing structures

Rys. 19.4. Możliwości ponownego wykorzystania konstrukcji budowlanych

Changes in the economic situation cause the collapse of traditional heavy industries. The remainder is a large number of large-volume buildings. The simplest and cheapest way to revitalize them is to reuse them. The direction of the transformation depends on the previous functions. Table 19.2 presents examples of solutions for the most popular types of industrial structures.

Table 19.2

Possibilities for the transformation of existing structures [3]

Industry	Type of structure	New function	Comment	
Common for all types of industry	offices	offices, flats		
	canteens	gastronomy		
	dressing rooms	offices, flats		
	washing rooms	offices, flats		
	laboratories	offices		
	low and insulated halls (up to 6m)	warehouse, commerce, sport		
	high and insulated halls (over 6m)	sports and entertainment halls		
	firestations, repairshops	conversion		
	motor roads	dismantling		road conversion depends on their location and class
	railway sub grade	dismantling		
silos, gases and liquids	dismantling			
containers				
conveyors, galleries, flyovers, pipelines, heat-generating plants,	conversion for communal and industrial aims	adjustment to suit communal purposes depends on location		

Table 19.2 cont.

	water intakes and tanks, sewage treatment plants, gas reduction stations, power substations, telecommunication lines		and parameters
Textile	multi-storey and small (up to 5m) insulated halls	offices, schools, flats	
Machine	multi-storey and small (up to 5m) insulated halls	offices, schools, flats	
Deep mines	dressing rooms, baths lamp rooms, control rooms sorting plant, coal scrubber hoist towers shaft top and hoisting machine structures	sport, swimming pools, gyms offices entertainment halls, commerce dismantling dismantling dismantling	conversion of sorting plant sometimes sport steel tower can be kept as local focus point
Thermal power plants	turbine-rooms boiler-rooms, mills, electro filters chimneys and cooling towers transformer station and power substations	sports and entertainment halls dismantling dismantling dismantling	low chimneys are maintained as relics
Steel mills, steelworks	agglomerating plant, blast furnace department, steelworks structures rolling mills, forges	dismantling dismantling	usually halls are too big and not insulated
Coking plants	ovens batteries, containers	dismantling	necessary soil cleaning
Chemical plants	pipe installations, tanks, reactors, columns	dismantling	necessary soil cleaning
Cement plants	rotary furnace	incinerating plants	
Food industry	all technological structures	dismantling	for sanitary reasons

During use, the building slowly loses its technical value, which is mainly due to the durability of building materials. Industrial facilities over 50 years old already have a low technical value, which is mainly due to much more difficult working conditions. These objects are exposed to strong vibrations and shocks from machines, aggressive chemical substances, and high thermal influences. Adaptability is also limited by changes in industrial technologies and technical standards.

Changing the function of a building usually involves the need for redevelopment. This may be due to a change in the load on the building or the disassembly of some elements of the load-bearing structure. Such interference in the system of the load-bearing structure causes changes in the distribution of internal forces and, consequently, the need to strengthen some elements of the structure. The legitimacy of strengthening and repair works may also result from long-term use in difficult conditions resulting in mechanical damage or from the aforementioned limitations in the durability of materials used for construction.

Rebuilding or strengthening existing buildings is usually more expensive and much more difficult than erecting new ones. Knowledge of old construction technologies, the ability to perform material tests and the possession of equipment enabling such reinforcements are required. Some construction materials of existing buildings may have been contaminated as a result of previous use of the building (e.g. concrete and masonry partitions soaked with oil, heavy metals, etc.). Building parts so contaminated must be removed and replaced with new, solid materials. Decontamination is a tedious and costly process.

A responsible decision on the potential ways of redevelopment can only be made by specialists with many years of construction experience.

19.4. Cases from practice

19.4.1. New Gliwice

The largest project realized in Gliwice. Redevelopment of the area of the former Gliwice mine and coking plant (Fig. 19.5). The original concept of revitalization of the post-mine area assumed the creation of a university with an economic and administrative profile and foreign language colleges in this area, as well as the creation of a business incubator and the preparation of developed investment areas for incubated enterprises [4]. In the first stage, the existing facilities were inspected, their

technical condition was determined in terms of their possible use. It was decided to leave the largest buildings (the hall, machinery, the director's villa). At the same time, shafts and coal processing facilities were qualified for demolition. The same happened to the buildings of the nearby coking plant (Fig 19.6). The economic analysis of the costs of demolition the coal processing plant facilities showed that the costs of removing the underground parts of the facilities (reaching up to 15 m below ground level) exceed the costs of demolishing the above-ground part, therefore it was decided to leave the elements below the level of 3.0 m in the ground and fill the voids with a mixture of rubble obtained from demolitions. A significant part of the heap on which the pit stone was stored was also removed. The selection of the material used to backfill the excavations and form embankments was carried out under strict construction supervision. In addition, a full and detailed inventory of the foundations left in the ground was made [5].

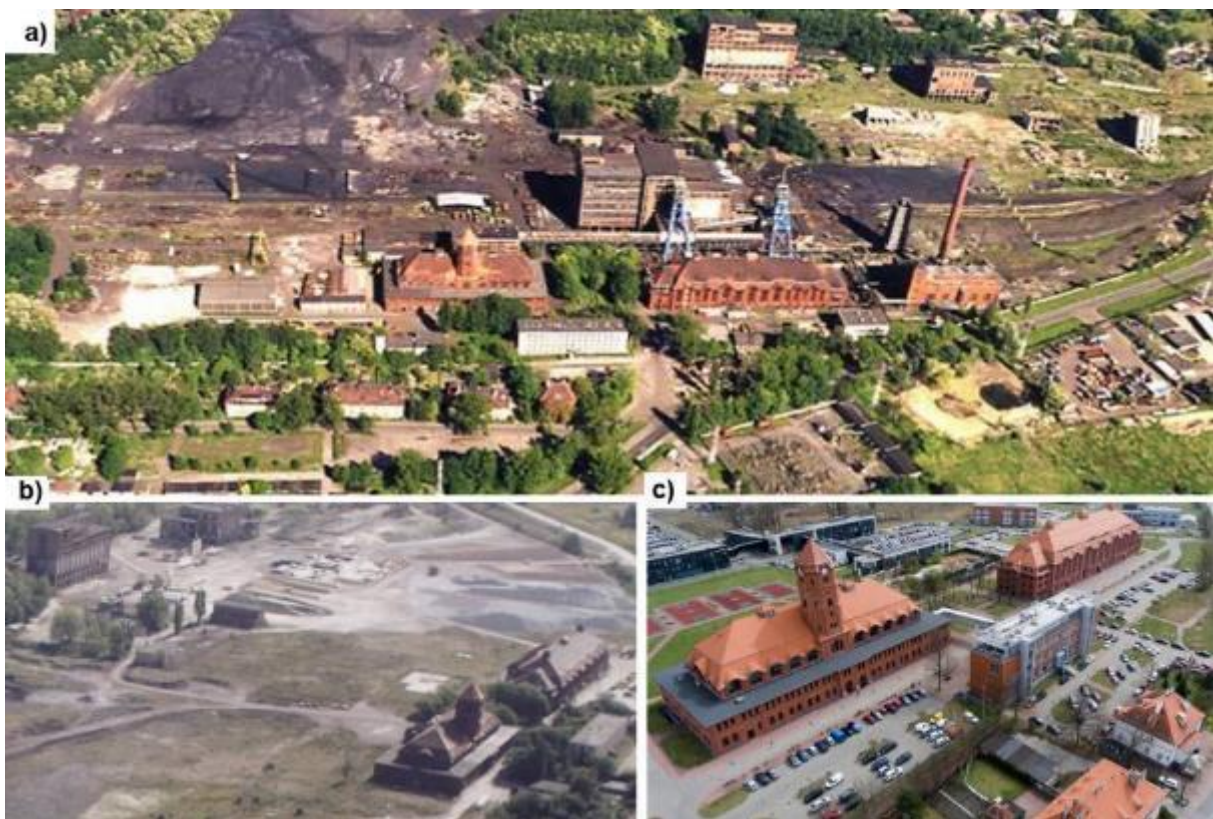


Fig. 19.5. Area of former Gliwice mine: a) before demolition, b) after first stage of demolition; c) nowadays

Rys. 19.5. Teren dawnej kopalni Gliwice: a) przed rozbiórką, b) po pierwszym etapie rozbiórki; c) obecnie

Finally, two larger facilities (mining and engine hall) were fully renovated with the expansion of the interior and construction of new structures inside (Fig 19.7). For example inside the mining hall, the second reinforced structure of the audience hall has

been erected. Nowadays it serves educational purposes and as headquarter of many local businesses including enterprises in the field of new technologies.



Fig. 19.6. Facilities of the Gliwice coking plant before demolition
Rys. 19.6. Budynki koksowni Gliwice przed wyburzeniem



Fig. 19.7. Machinery hall during reconstruction: a) historic roof truss, b) façade
Rys. 19.7. Cechownie podczas przebudowy: a) historyczna więźba dachowa, b) fasada

19.4.2. Gliwice Wire Manufacture

The history of the wire factory in Gliwice dates back to the mid-twentieth century and coincides with the industrial boom in Upper Silesia. The buildings subject to revitalization in the post-war period served as workshops for the company's Mechanical and Metallurgical School Complex. They ended their activity with the collapse of the industry in the first years of the 21st century. The buildings were taken over by the social Association of Animators of the Comprehensive Youth

Development and their revitalization process began. The revitalization project has been included in the Local Revitalization Program of Gliwice. It is planned to adapt two halls to perform socio-cultural and service functions.

The architectural and construction design assumed leaving the buildings as unchanged as possible to preserve the industrial character of the complex. The buildings required thermal insulation, replacement of windows and doors. It was decided to keep the roof skylight and use the well-lit upper gallery as an exhibition space [6].



Fig. 19.8. Wire manufacture Gliwice: a) façade, b) interior, c) roof structure, d) ceiling structure
 Rys. 19.8. Fabryka Drutu Gliwice: a) fasada, b) wnętrze, c) konstrukcja dachu, d) konstrukcja stropu

Neglected and not renovated for many years, the building required a comprehensive renovation. The technical condition tests covered the steel structure of the roof, walls, ceilings and foundations (Fig. 19.8). The lack of archival technical documentation made it necessary to recreate the reinforcement system. Strength analyzes showed slight deficits in the load capacity of the roof structure, especially the I-section purlins. It was recommended to strengthen these elements when introducing layers of insulation [7]. The walls in the south-western part, which were clearly cracked as a result of complicated ground and water conditions related to the vicinity

of the former section of the Kłodnica canal [8], also required repair. The building of the carpenter's workshop required greater intervention, especially the timber and roof truss, which was qualified for replacement or comprehensive strengthening [9].

In addition, due to the construction of an expressway in the vicinity, recommendations were introduced regarding the monitoring of dynamic impacts on the structure of buildings [10].

Due to the change in the function of the buildings, an acoustic assessment was carried out in terms of the reception of musical sound [11]. It included reverberation time measurements and subjective and objective evaluation of room acoustics. The results of the tests were assessed as good, at the same time the possibility of their improvement by increasing the acoustic absorption of the room was indicated.

19.5. Conclusions

Bringing degraded land back to use is our duty to the environment. It is often a long and costly process, requiring the involvement of specialists in many fields. The paper presents the phases of the revitalization process and the tasks performed by a construction engineer. Although his role is often underestimated or misunderstood, he participates in the revitalization process from the very beginning. In the conceptual phases, construction engineer deals with technical reconnaissance, co-creates the reconstruction concept. He tries to adapt the solutions proposed by architects to the standards, law and technical capabilities of the building. This was shown on the example of the revitalizations of two large industrial complexes in Gliwice.

Bibliography

1. Poborski P.: Zarządzanie projektami i ocena ryzyka finansowo-technicznego w procesie rewitalizacji terenów po-przemysłowych, Materials of the Lepob Semminar, 17.12.2004 Gliwice Poland.
2. Ferber U. et al.: Brownfields Handbook Cross-disciplinary educational tool focused on the issue of brownfields regeneration, VŠB-TU Ostrava 2006, p. 95.
3. Gasidło K., Gorgoń J.: Modelowe przekształcenia terenów poprzemysłowych i zdegradowanych, Centrum Usług Drukarskich H. Miler, Chorzów 1999, p. 175.
4. Szulc T.: Rewitalizacja – doświadczenia gliwickie, Materials of the Lepob Semminar, 17.12.2004 Gliwice Poland.

5. Pająk Z., Sękowski J.P.: Odzyskiwanie terenów o likwidowanych obiektach górniczych, Materials of the Lepob Seminar, 17.12.2004 Gliwice Poland.
6. Grzesik T.: Architektoniczna wizja rewitalizacji budynków Fabryki Drutu, Dawna Fabryka Drutu Gliwice. Monografia, Spotkanie z Zabytkiem, vol. 3, Wydaw. Wydziału Budownictwa Politechniki Śląskiej, Gliwice 2008, p.11–51.
7. Górski M., Krzywoń R.: Techniczne możliwości adaptacji budynku głównego Fabryki Drutu na Centrum Wystawiennicze, Dawna Fabryka Drutu Gliwice. Monografia, Spotkanie z Zabytkiem, vol. 3, Wydaw. Wydziału Budownictwa Politechniki Śląskiej, Gliwice 2008, p. 61–76.
8. Sękowski J., Kwiecień S., Bartoszek Z.: Geotechniczne warunki posadowienia budynku dawnej Fabryki Drutu w Gliwicach, Dawna Fabryka Drutu Gliwice. Monografia, Spotkanie z Zabytkiem, vol. 3, Wydaw. Wydziału Budownictwa Politechniki Śląskiej, Gliwice 2008, p. 29–36.
9. Górski M., Knoppik A.: O konstrukcji zabytkowego budynku Stolarni w Fabryce Drutu, Dawna Fabryka Drutu Gliwice. Monografia, Spotkanie z Zabytkiem, vol. 3, Wydaw. Wydziału Budownictwa Politechniki Śląskiej, Gliwice 2008, p. 77–90.
10. Gromysz K.: Opis aparatury i sposobu pomiaru drgań zabytkowego budynku dawnej Fabryki Drutu w Gliwicach, Dawna Fabryka Drutu Gliwice. Monografia, Spotkanie z Zabytkiem, vol. 3, Wydaw. Wydziału Budownictwa Politechniki Śląskiej, Gliwice 2008, p. 54–62.
11. Dulak L., Marchacz M., Nowoświat A., Żuchowski R.: Ocena akustyczna hali dawnej Fabryki Drutu adaptowanej do odbioru dźwięku muzycznego, Dawna Fabryka Drutu Gliwice. Monografia, Spotkanie z Zabytkiem, vol. 3, Wydaw. Wydziału Budownictwa Politechniki Śląskiej, Gliwice 2008, p. 17–28.

20. ASPEKTY BEZPIECZEŃSTWA TRANSPORTU WODORU, AMONIAKU ORAZ MIESZANIN WODÓR/METAN I AMONIAK/WODÓR

20.1. Wprowadzenie

Zmniejszające się zasoby paliw kopalnych oraz jednoczesny rozwój gospodarki związane są z coraz większą konsumpcją energetyczną. Rozwój każdego kraju powinien być jednak prowadzony w zgodzie z założeniami zrównoważonego rozwoju oraz troską o środowisko. Dyskusje i zobowiązania narzucają potrzebę ciągłej redukcji emisji gazów cieplarnianych. Wszystkie te działania prowadzą do poszukiwań nowych, alternatywnych paliw, które mogłyby być wykorzystane np. w transporcie lub energetyce. Obok paliw o ugruntowanej pozycji takich, jak np. węgiel, benzyna czy też gaz ziemny, coraz popularniejsze stają się te, pozwalające wpłynąć na zahamowanie szkodliwych emisji gazów do atmosfery. Są to np. wodór, amoniak czy też biogaz. Każda z tych substancji charakteryzuje się różnymi właściwościami fizykochemicznym, co w znacznym stopniu definiuje potencjał ich wykorzystania. Każda z nich jest również substancją o charakterze niebezpiecznym, która na skutek niekontrolowanego uwolnienia może tworzyć potencjalne zagrożenie dla ludzi i otoczenia. Tego typu awarie miały miejsce w przeszłości i dotyczą każdego z procesów od produkcji do końcowego użytkowania. Przykładowo uwolnienie znacznych ilości amoniaku na skutek wykolejenia się pociągu w 2022 roku w Serbii spowodowało śmierć jednej osoby, a kolejne kilkadziesiąt odniosło obrażenia. W tym samym roku w USA 420 kg wodoru transportowanego z wykorzystaniem ciężarówki, która uległa wypadkowi spowodowało z kolei zranienia 3 osób [1–3].

W rozdziale skupiono się w szczególności na zagadnieniu zagrożeń wynikających z awarii w procesach transportu wodoru i amoniaku oraz mieszanin wodoru z metanem oraz amoniaku z wodorem. Zagrożenia te wynikają przede wszystkim z palności oraz toksyczności tych substancji. Pierwsza z mieszanin stanowi przede wszystkim alternatywę dla procesów transportu wodoru, tj. zakłada się, że w celu jego transportu można wykorzystać istniejącą sieć rurociągów przesyłu gazu zimnego

(metanu). Druga z nich, tj. połączenie amoniaku z wodorem jest rozwiązaniem stosowanym z kolei przede wszystkim w celu poprawy warunków prowadzenia procesu spalania amoniaku [2, 4].

20.2. Charakterystyka gazów

20.2.1. Wodór i mieszanina wodór/metan

Wodór określany jest jako czysty i efektywny nośnik energii, który może być produkowany z wykorzystaniem paliw kopalnych oraz źródeł odnawialnych. Obecnie najpopularniejszym procesem produkcji wodoru jest reforming parowy metanu. W zależności od surowców lub technologii pozyskania rozróżnia się jego różne kolory [4–6]:

- wodór zielony jako produkt otrzymywany w procesie elektrolizy przy wykorzystaniu energii ze źródeł odnawialnych z powodu zeroemisyjności procesu jest najbardziej pożądanym,
- wodór szary produkowany jest z wykorzystaniem procesu reformingu parowego gazu ziemnego i innych węglowodorów,
- wodór niebieski wytwarzany jest w procesach opierających się na wykorzystaniu paliw kopalnych w połączeniu z technologiami wychwytu, składowania lub przetwarzania dwutlenku węgla,
- wodór biały pochodzi z naturalnych źródeł geologicznych,
- wodór żółty produkowany jest w procesie elektrolizy z wykorzystaniem energii słonecznej i w związku z tym często określany jest jako jeden z podtypów wodoru zielonego,
- wodór brązowy i wodór czarny pozyskiwane są w procesie gazyfikacji odpowiednio węgla brunatnego i kamiennego,
- wodór turkusowy pozyskiwany jest w procesie pirolizy metanu lub w procesach przetwarzania odpadowych tworzyw sztucznych,
- wodór fioletowy lub czerwony produkowany jest w procesie elektrolizy z wykorzystaniem energii wytwarzanej w elektrowniach jądrowych.

Wodór to bezbarwny i bezwonny gaz. Jest ok. 14,4 razy lżejszy od powietrza. Słabo rozpuszcza się w wodzie. Jest najprostszym pierwiastkiem chemicznym, który w temperaturze pokojowej jest stosunkowo mało reaktywny. Podstawowe właściwości

wodoru, w zestawieniu z innymi paliwami, przedstawiono w tabeli 20.1. Wodór pali się bladoniebieskim płomieniem, a produktem jego spalania jest woda. Wykorzystywany jest w energochłonnych sektorach gospodarki, np. w transporcie. Stanowi również surowiec do wielu procesów przemysłowych, takich jak, np. produkcja amoniaku i metanolu, produkcja szkła, przetwórstwo spożywcze czy też rafinacja ropy naftowej. Wykorzystywany jest również jako paliwo raketowe w sektorze lotniczym i kosmicznym oraz znajduje zastosowanie w palnikach do cięcia. Wodór charakteryzuje znaczący potencjał w gospodarce o zerowej emisji netto, ponieważ może być stosowany w transporcie, ciepłownictwie, energetyce i magazynowaniu energii bez emisji gazów cieplarnianych [7–11].

Wysoka palność wodoru wymaga ostrożności w procedurach związanych z jego użytkowaniem oraz prowadzi do wielu problemów związanych z bezpieczeństwem. Problem obecności wodoru w metalach i stopach również nie może zostać pominięty z racji jego wpływu na ich własności fizykochemiczne, które objawiają się w postaci zmniejszonej wytrzymałości oraz zwiększonej kruchości materiałów. Wodór może się również przyczynić do zwiększenia intensyfikacji procesów korozyjnych [9, 12, 13].

Procesy transportu i magazynowania wodoru realizowane są w zależności od jego stanu fizycznego w danej temperaturze i ciśnieniu. Wodór najczęściej magazynowany jest w postaci sprężonej w odpowiednich, stalowych lub wykonanych z kompozytów zbiornikach. Materiały zbiorników wodorowych powinny być wytrzymałe oraz na tyle lekkie, aby można je było wykorzystać, np. w zastosowaniach mobilnych. Duże ilości wodoru mogą być również zmagazynowane w strukturach geologicznych, np. w kawernach solnych. Skroplony wodór przechowuje się natomiast w specjalnych izolowanych zbiornikach, w temperaturach kriogenicznych. Taka metoda utrzymywania gazu w bardzo niskiej temperaturze wymaga jednak zastosowania m.in. odpowiednich izolacji, które znacząco zwiększają całkowity koszt tego typu rozwiązań. Technologie magazynowania wodoru opierają się również na odpowiednich materiałach, np. adsorbenty, wodorki czy też ciekłe związki organiczne. Materiały te pozwalają na wiązanie wodoru za pomocą fizysorpcji (adsorbenty) oraz chemisorpcji (pozostałe układy) [11, 14].

Transport wodoru odbywa się w zależności od potrzeb w postaci gazowej lub ciekłej, z wykorzystaniem rurociągów, zbiorników, cystern, kolei oraz statków. Konkurencyjność różnych technologii jest zależna od odległości na jaką transportowany jest ten nośnik energii oraz od jego ilości i sposobu końcowego wykorzystania. Najbardziej ekonomicznym rozwiązaniem jest zużycie wodoru w miejscu jego wytworzenia. Jednak nie zawsze jest to możliwe i wtedy najbardziej

efektywną i ekonomiczną formą przesyłu jego znacznych ilości na dalekie odległości pozostają rurociągi. Obecnie na świecie istnieje ich ok. 4500 km, z czego ok. 1500 km znajduje się w Europie [15]. Badania nad nowymi technologiami usprawniającymi procesy zarówno transportu, jak i magazynowania wodoru trwają nieustannie, ponieważ każde kolejne miejsca jego końcowego użytkowania (np. stacje tankowania) będą wymagały znacznego rozwoju infrastruktury. Budowa nowej sieci dystrybucji wodoru wiąże się z dużymi kosztami takiej inwestycji, pozwoliłaby jednak na sprostanie naciskom stawianym przez decydentów o wykorzystaniu tej substancji jako paliwa przyszłości. Jednym z pomysłów uniknięcia kosztów związanych z budową nowej infrastruktury dystrybucji dedykowanej wodorowi jest wykorzystanie istniejącej sieci przesyłu gazu ziemnego przez dostrzyk wodoru do istniejących gazociągów i transport mieszaniny metan/wodór. W takim przypadku należy jednak mieć na uwadze, że gęstość energetyczna wodoru jest równa 1/3 gęstości gazu ziemnego. Badania wykazały, że zawartość wodoru na poziomie 3% spowoduje, więc zmniejszenie ilości transportowanej energii o 2%. To z kolei będzie wiązało się z potrzebą zwiększenia obciążenia sieci przesyłowej i dystrybucyjnej, a zatem również z większymi kosztami eksploatacji. Istotnym zagadnieniem pozostaje również kwestia określenia maksymalnego poziomu stosunku wodor/metan w mieszaninie. Ten poziom zależny będzie od odbiorców końcowych i powinien być ściśle określony oraz dostosowany do możliwości technicznych wykorzystywanych elementów instalacji, a także uwzględniać kwestie bezpieczeństwa. Wartość ta waha się od 0,1%, np. w Belgii, Nowej Zelandii, USA, do 10% i 12% odpowiednio w Niemczech oraz Holandii. Badania wykazują jednak, że stężenie na poziomie do 30% nie powinno wpłynąć na prawidłową pracę urządzeń domowych takich, jak np. kotły czy płyty gazowe. Z kolei istniejące systemy przesyłu gazu powinny tolerować zawartość wodoru na poziomie 5–10%. Mieszanina wodoru z gazem ziemnym jest nie tylko odpowiedzią na zapotrzebowanie rozbudowy sieci przesyłu i dystrybucji wodoru, ale jest również opcją, pozwalającą na poprawę warunków procesu spalania paliw i wyeliminowanie problemów związanych ze spalaniem w tradycyjnych silnikach benzynowych i wysokoprężnych (przy minimalnych nakładach inwestycyjnych). Zasadnicza różnica pomiędzy paliwami gazowymi a ciekłymi wynika z kwestii ich łatwiejszego mieszania się z powietrzem, co znacząco poprawia m.in. emisyjność toksycznych produktów spalania. Prowadzone badania wykazują, że stosowanie mieszaniny metan/wodór przyczynia się do redukcji emisji substancji toksycznych i gazów cieplarnianych o ok. 8–15%. Pozwala również na zmniejszenie poziomu zużycia paliwa [13, 14, 16–18].

Właściwości gazów [2, 9, 19, 20]

właściwości	wodór	amoniak	metan
masa cząsteczkowa	2 g/mol	17 g/mol	16 g/mol
temperatura wrzenia	-253°C	-33,2°C	-162°C
temperatura samozapłonu	773-850 K	930 K	859 K
gęstość (T=0°C i p=1,01325 bara)	0,09 kg/m ³	0,76 kg/m ³	0,72 kg/m ³
punkt krytyczny	33,2 K, 1,3 bara	406 K, 113 barów	191 K, 46 bara
ciepło spalania	142 MJ/kg	19 MJ/kg	56 MJ/kg
ciepło parowania	446 kJ/kg	1375 kJ/kg	512 kJ/kg
zakres granic palności w powietrzu	4–75%	15–28%	4,4–16,5 %
główne zagrożenia	wybuchowy, palny	toksyczny, palny	wybuchowy, palny
próg wyczuwalności zapachu	bezwonny	5–50 ppm	bezwonny
barwa	bezbarwny	bezbarwny	bezbarwny

20.2.2. Amoniak i mieszanina amoniak/wodór

Amoniak jest bezbarwnym i lżejszym od powietrza gazem. Dobrze rozpuszcza się w wodzie. Charakteryzuje się ostrym i drażniącym zapachem, a jego próg wyczuwalności w powietrzu wynosi ok. 5 ppm. Amoniak ma właściwości toksyczne i działa drażniąco/żrąco na oczy, skórę i drogi oddechowe. Jest kompatybilny z większością powszechnie stosowanych materiałów, z wyjątkiem m.in. miedzi i mosiądzu, dla których jest korozyjny. Jest palny, ale trudny do zapłonu. Od wielu lat wykorzystywany jest przede wszystkim w przemyśle nawozów sztucznych oraz w produkcji celulozy, papieru i tekstyliów. Zawarty jest również w wielu domowych i przemysłowych środkach czyszczących lub produktach stosowanych do mycia okien. Znany jest także jako czynnik chłodniczy, stosowany w dużych instalacjach przemysłowych. Obecnie wzrasta jednak zainteresowanie amoniakiem jako paliwem bezemisyjnym, nieemitującym CO₂ w fazie użytkowania, ukierunkowanym na zastosowanie związane z transportem lub wytwarzaniem ciepła i energii elektrycznej. Amoniak ma jednak niską prędkość płomienia i odporność na samozapłon. Jego mieszanina z innymi paliwami, w tym m.in. z wodorem czy też metanem, jest więc odpowiedzią na poprawę procesu jego spalania. Prowadzone badania i analizy wskazują, że najlepszym, bezwęglowym promotorem do usprawnienia procesu spalania amoniaku jest wodór, ze względu na szybkość spalania i szeroki zakres

palności. Domieszanie wodoru poprawia proces zapłonu, spalanie i wydajność silnika paliwa amoniakalnego [5, 9, 19–22].

Podstawową metodą produkcji amoniaku jest reakcja Habera-Boscha, czyli połączenie azotu z powietrza z wodorem pochodzącym przede wszystkim z gazu ziemnego (metanu), w proporcji 1 objętości azotu do 3 objętości wodoru. Proces ten zachodzi w odpowiednich warunkach ciśnienia i temperatury oraz w obecności katalizatora. Jego największymi wadami są wysoka emisja gazów cieplarnianych oraz znaczne zużycie energii [21, 23].

Amoniak ma większą objętościową gęstość energii niż wodór i jest łatwiejszy do przechowywania i transportu. Światowa produkcja amoniaku na poziomie ok. 150 mln ton rocznie powoduje, że jest to związek o dojrzałych technologicznie metodach produkcji, transportu i magazynowania. Obecnie przesyłany jest on z wykorzystaniem sieci dystrybucji w postaci pojazdów, kolei, statków i rurociągów. Od kilkudziesięciu lat ciekły amoniak dla przemysłu nawozowego transportowany jest z wykorzystaniem statków i rurociągów. Najdłuższym na świecie rurociągiem przesyłowym amoniaku o długości ok. 2500 km jest rurociąg z zakładów produkcyjnych w Rosji do portu w Odessie. Największe zbiorniki amoniaku znajdują się z kolei w Katarze i pozwalają na przechowywanie 50 tys. ton tej substancji. Natomiast w Stanach Zjednoczonych, które są jednym z liderów produkcji i największym importerem amoniaku, znajduje się ok. 10 tys. miejsc składowania, połączonych siecią rurociągów o długości ok. 3000 km. Dalszy wzrost udziału amoniaku w rynku przede wszystkim paliw spowoduje oczywiście tworzenie kolejnych, nowych łańcuchów dostaw [14, 19, 24].

20.3. Zagrożenia związane z użytkowanym gazów

Wykorzystywanie, magazynowanie oraz transport zarówno wodoru, jak i amoniaku, a także ich mieszanin z innymi substancjami budzi obawy dotyczące bezpieczeństwa prowadzenia tego typu procesów. Wodór jest palny i charakteryzuje się niską energią zapłonu oraz szerokim zakresem palności. Amoniak jest natomiast żrący i toksyczny, także palny. Ich niekontrolowane uwolnienie może więc skutkować poważnymi konsekwencjami dla ludzi i otoczenia. Zagrożenie to będzie zależne od przebiegu awarii. Właściwości fizykochemiczne paliw, a także warunki otoczenia sprzyjają sytuacjom, w których paliwa mogą: ulec zapłonowi, nie ulec zapłonowi, przemieszczać się w postaci chmury o niebezpiecznym poziomie koncentracji lub rozproszyć się w powietrzu bez poważnych konsekwencji. Zdarzeniami

niebezpiecznymi, skutkującymi konsekwencjami dla ludzi i otoczenia, będą więc pożary, wybuchy etc.

W przypadku wystąpienia pożaru lub wybuchu wodoru, amoniaku, mieszaniny wodór/metan lub mieszaniny amoniak/wodór niebezpiecznymi dla ludzi i otoczenia skutkami będą bezpośrednio zetknięcie się z płomieniem oraz oddziaływanie strumienia ciepła generowanego z pożaru. W przypadku wybuchu będzie to bezpośrednio oddziaływanie fali ciśnieniowej oraz możliwość uderzenia przez latające odłamki rozerwanej instalacji lub zniszczonych budynków. Gdy nastąpi uwolnienie amoniaku oraz jego mieszaniny z wodorem zagrożenie będzie również wynikało z oddziaływania określonego poziomu stężenia [13, 19, 23, 25, 26].

Przykładowe, niebezpieczne dla ludzi poziomy strumienia ciepła generowanego z pożaru, fali ciśnieniowej generowanej z wybuchu oraz stężenia amoniaku wraz z konsekwencjami przedstawiono w tabelach 20.2–20.4 [19, 22, 25–27].

Tabela 20.2

Wpływ strumienia ciepła generowanego z pożar na ludzi oraz budynki/instalacje

strumień ciepła	wpływ na ludzi	wpływ na budynki/instalacje
37,5 kW/m ²	1 min – 100% zgonów 10 s – 1% zgonów	uszkodzenia instalacji procesowych (w tym zbiorników stalowych) lub maszyn
25 kW/m ²	10 s – poważne zranienia	minimalna energia do zapalenia drewna przy nieskończenie długim czasie ekspozycji (bez płomienia)
12,5 kW/m ²	1 min – 1% ludzi doznaje poważnych obrażeń 10 s – oparzenie pierwszego stopnia	minimalna energia do topienia tworzywa sztucznego
4 kW/m ²	powyżej 20 s – odczuwanie bólu, mogą zdarzyć się nawet oparzenia	30 min – pękanie szkła
1,5 kW/m	brak dyskomfortu i zagrożenia	brak szkód

Tabela 20.3

Wpływ fali ciśnieniowej generowanej z wybuchu na ludzi oraz budynki/instalacje

fala ciśnieniowa	wpływ na ludzi	wpływ na budynki/instalacje
137,9 kPa	prawie 100% zgonów	poważne uszkodzenie lub zawalenie budynków betonowych
68,9 kPa	większość ludności to ofiary śmiertelne	całkowite zniszczenie budynków, przesunięcie i poważne uszkodzenie ciężkich maszyn i urządzeń
34,5 kPa	poważne obrażenia oraz ofiary śmiertelne są powszechne	zawalenie większości budynków
20,7 kPa	poważne obrażenia są powszechne, mogą wystąpić ofiary śmiertelne	zawalenie budynków mieszkalnych, niewielkie uszkodzenia ciężkich maszyn i urządzeń, zniekształcenie i wyrwanie z posadowienia (fundamentu) konstrukcji stalowych
13,8 kPa	ranni w wyniku oddziaływania latającego szkła i odłamków (gruzu)	zniszczenie płyt gipsowo-kartonowych, elementów stalowych i aluminiowych, uszkodzenie mocowań i posadowień elementów konstrukcyjnych
6,9 kPa	ranni w wyniku oddziaływania latającego szkła i odłamków (gruzu)	występują umiarkowane uszkodzenia domów
1,5 kPa	mogą wystąpić lekkie obrażenia od odłamków (szyb)	pęknięte szyby w drzwiach i oknach

Tabela 20.4

Wpływ różnych poziomów stężenia amoniaku na ludzi

stężenie	wpływ na ludzi
5000 ppm	natychmiastowa śmierć
700–1700 ppm	ubezwłasnowolnienie z powodu łzawienia oczu i kaszlu
1000 ppm	natychmiastowe łzawienie, zaburzenia widzenia, poważne trudności w oddychaniu, podrażnienie skóry po kilku minutach
500 ppm	30 min – podrażnienie górnych dróg oddechowych, łzawienie oczu
134 ppm	5 min – łzawienie oczu, podrażnienie oka, podrażnienie nosa, podrażnienie gardła, podrażnienie klatki piersiowej
140 ppm	2 godz. – silne podrażnienie, konieczność opuszczenia miejsca narażenia
100 ppm	2 godz. – dokuczliwe podrażnienie oczu i gardła
20–50 ppm	łagodny dyskomfort, w zależności od tego, czy dana osoba jest przyzwyczajona do zapachu amoniaku

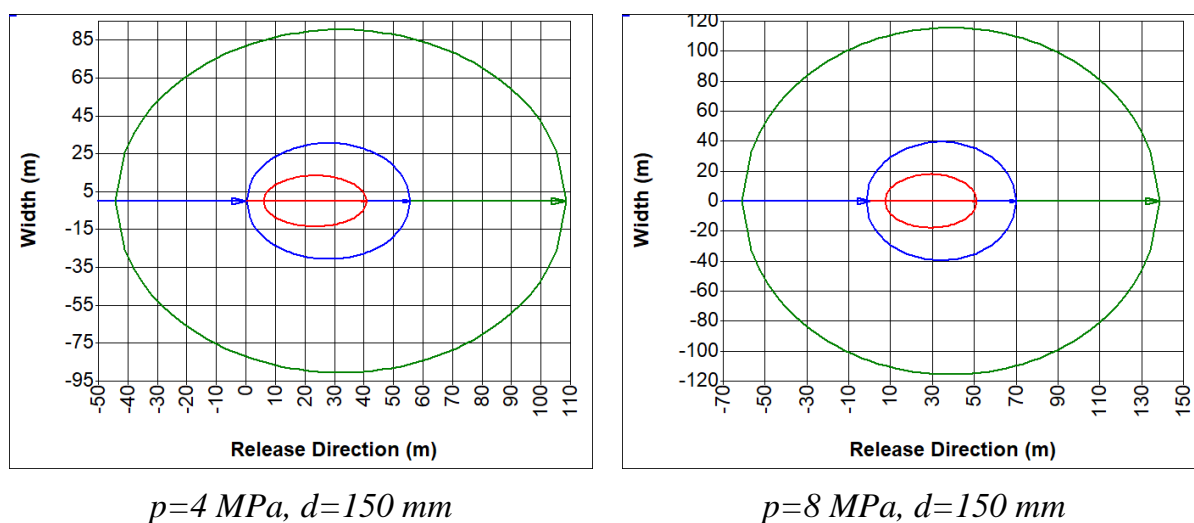
20.3.1. Wodór i mieszanina wodór/metan

a) wodór

Jak już wspomniano procesy magazynowania, transportu i użytkowania wodoru wiążą się z zagrożeniem wynikającym z jego właściwości fizykochemicznych. W karcie charakterystyki tej substancji określona jest ona jako skrajnie łatwopalna. Zainicjowanie spalania wodoru wymaga niewielkiej energii, wodór charakteryzuje się również niską wartością dolnej granicy palności. Istotą cechą wpływającą na bezpieczeństwo jego użytkowania jest również kwestia związana z procesem jego rozprężania, tzn. podczas procesu rozprężania gazu, a więc np. przy wypływie z nieszczelności, temperatura wypływającej strugi gazu rośnie. Wodór w zamkniętych pomieszczeniach może również, przy odpowiednio wysokiej koncentracji, doprowadzić do uduszenia. Nie należy również zapominać, iż kontakt z wodorem skroplonym, o bardzo niskiej temperaturze kriogenicznej, może prowadzić do głębokich odmrożeń. Wodór przyczynia się także do obniżenia własności wytrzymałościowych stali oraz przyczynia się do powstawania mikropęknięć. Prowadzone statystyki zdarzeń z udziałem wodoru z przeszłości wskazują m.in., że przyczyny awarii związane są z rodzajem wykorzystywanej instalacji, tj. czy będziemy mieli do czynienia z rurociągami przesyłowymi czy też zbiornikami zainstalowanymi np. na pokładzie pojazdów. Dla rurociągów wśród najczęstszych przyczyn awarii wymienić należy przede wszystkim błędy w trakcie prowadzenia prac inżyniersko-budowlanych, nieprawidłowo prowadzoną eksploatację czy też korozję. Dla zbiorników awarie będą z kolei wynikiem przede wszystkim nieprawidłowo prowadzonej eksploatacji oraz błędów ludzkich [9, 12, 13, 28].

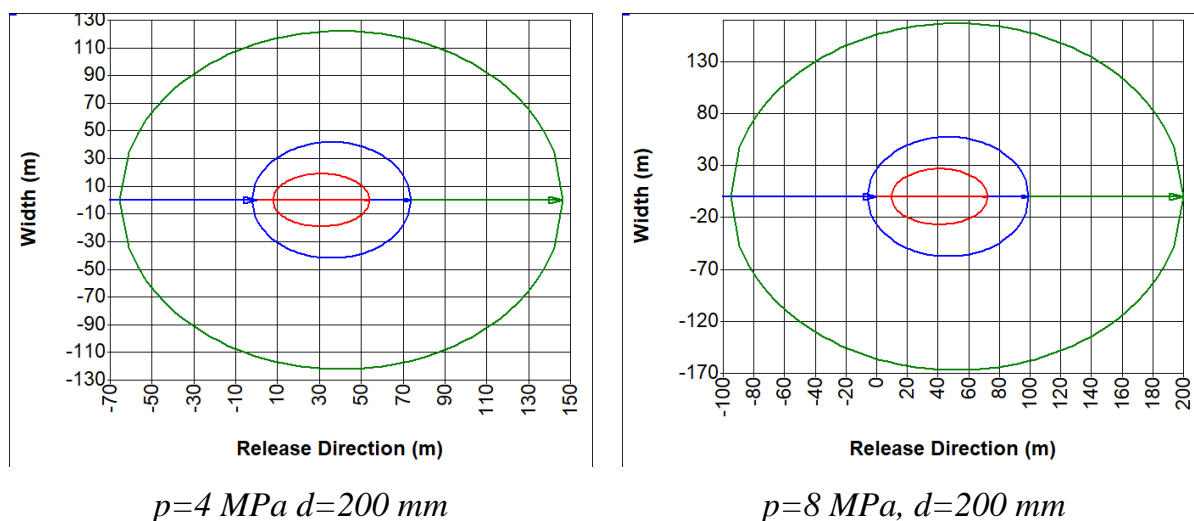
Na rysunkach poniżej przedstawiono przykładowe strefy zagrożenia, związane z wyciekami i pożarem wodoru, przy założeniu awarii rurociągu transportującego. Istniejące rurociągi, działające obecnie na terenie obiektów przemysłowych takich, jak rafinerie i zakłady chemiczne, działają najczęściej pod ciśnieniem od ~3,5 MPa do ~8,3 MPa (500–1200 psi) [29]. W celach analizy założono, więc przykładowy krótki rurociąg przesyłowy o średnicy 150 mm i 200 mm, długości 5 km oraz ciśnieniu 4 MPa i 8 MPa. Współczynnik określający stosunek pola powierzchni otworu (uszkodzenia) do pola przekroju poprzecznego rurociągu a wynosi 0,2. Na rys. 20.1 przedstawiono strefy zagrożenia związane ze strumieniem ciepła generowanym z pożaru uwolnionego wodoru. Krzywe na rysunku odpowiadają różnym poziomom tego strumienia, zgodnie z tabelą 20.2. Kolor czerwony – strumień ciepła o wartości

powyżej $37,5 \text{ kW/m}^2$ powodujący zgon ludzi, kolor niebieski – strumień ciepła o wartości powyżej $12,5 \text{ kW/m}^2$ powodujący oparzenia ludzi oraz kolor zielony – strumień ciepła o wartości $1,5 \text{ kW/m}^2$ nie stwarzający zagrożenia dla ludzi [30].



Rys. 20.1. Strefy zagrożenia dla pożaru wodoru (rurociąg, $a=0,2$)
Fig. 20.1. Hazard zones for hydrogen fire (pipeline, $a=0,2$)

Zmianę powyższych stref zagrożenia dla tych samych parametrów, ale przy założeniu średnicy rurociągu równej 200 mm przedstawiono na rys. 20.2.



Rys. 20.2. Strefy zagrożenia dla pożaru wodoru (rurociąg, $a=0,2$)
Fig. 20.2. Hazard zones for hydrogen fire (pipeline, $a=0,2$)

Analizując powyższe wykresy, można zauważyć, że dla każdego analizowanego przypadku wystąpi strefa zagrożenia życia ludzkiego na skutek oddziaływania strumienia ciepła, generowanego z pożaru wodoru. Najdłuższy zasięg tych stref

wynosi ok. 70 m, najkrótszy – ok. 40 m. Zasięgi stref wzrastają zarówno przy zwiększeniu ciśnienia w rurociągu, jak i przy zwiększeniu średnicy rurociągu.

Strefy bezpieczne dla ludzi znajdujących się w pobliżu miejsca awarii (pożaru) obejmą zasięg od ok. 110 m do 200 m.

b) mieszanina wodór/metan

Jak już wspomniano mieszanina wodoru z metanem jest przede wszystkim możliwością, która stanowi odpowiedź na potrzebę zwiększenia transportu wodoru, wynikającą z jego przyszłych zastosowań oraz zminimalizowania kosztów budowy nowej infrastruktury wodorowej. Dodatkowo przy zastosowaniu mieszaniny w silnikach na gaz ziemny dodatek wodoru usprawnia proces spalania, m.in. przez poprawę prędkości spalania płomienia. Zastosowanie w spalaniu paliwa w postaci mieszaniny metan/wodór jest również przyjaźniejsze dla środowiska, tj. zmniejsza emisję w stosunku do procesu spalania samego metanu. Mieszanina wodoru oraz metanu to bezbarwny i bezwonny gaz. Jest to substancja, z racji właściwości jej składników, bardzo łatwopalna. Nie należy więc zapominać o kwestiach związanych z bezpieczeństwem stosowania tego typu mieszanek. Dodatek wodoru do metanu zmienia m.in. zakresy palności metanu (tabela 20.5). Przyszłe badania nad mieszaniną tych dwóch substancji obejmują więc ciągłe doskonalenie procesu ich spalania, ale również procesów ich transportu, magazynowania itp. w kontekście bezpieczeństwa i poprawy warunków ich prowadzenia [2, 16, 17, 30].

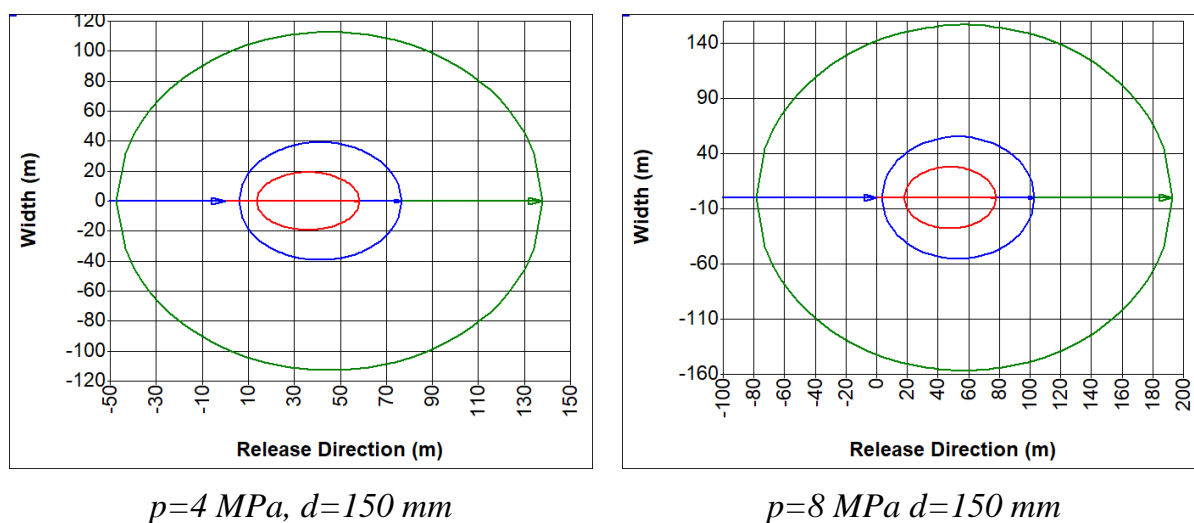
Tabela 20.5

Zmiana granic palności mieszaniny wodór/metan

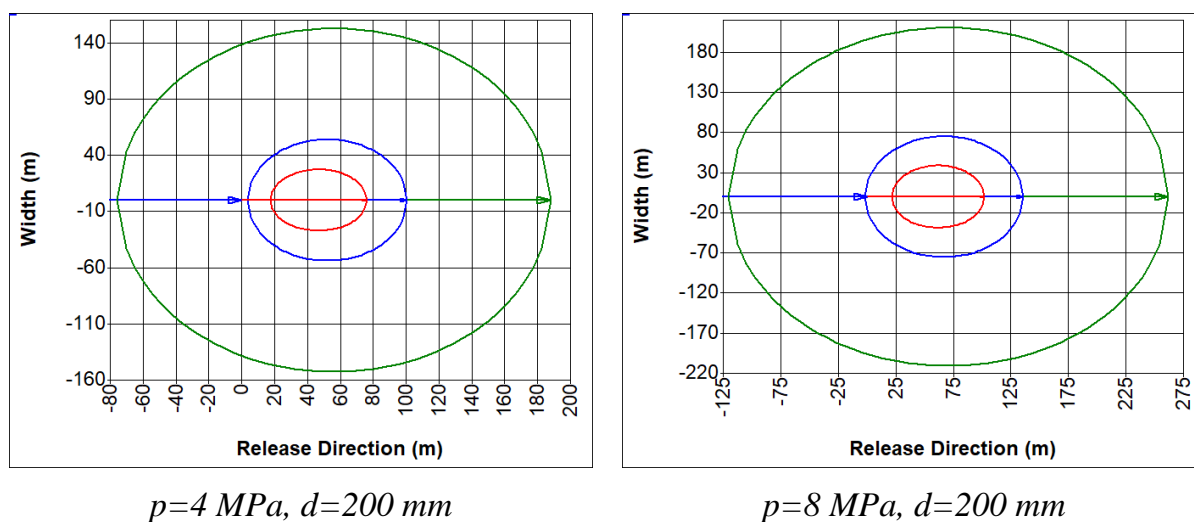
H₂/CH₄	0/100	20/80	40/60	50/50	60/40	80/20	100/0
LFL	4,00%	4,31%	4,23%	4,19%	4,15%	4,07%	4,40%
UFL	75,00%	19,55%	23,98%	27,05%	31,02%	43,88%	16,50%

Przykładowe strefy zagrożenia związane z pożarem mieszaniny wodór/metan uwolnionej z rurociągu o ciśnieniu 4 MPa i 8 MPa oraz długości 5 km i średnicy 150 mm oraz 200 mm przedstawiono na rysunkach 20.3 i 20.4. Krzywe na rysunkach odpowiadają różnym poziomom strumienia ciepła generowanego z pożaru zgodnie z tabelą 20.2. Kolor czerwony – strumień ciepła o wartości powyżej 37,5 kW/m² powodujący zgon ludzi, kolor niebieski – strumień ciepła o wartości powyżej 12,5 kW/m² powodujący oparzenia ludzi oraz strumień ciepła o wartości 1,5 kW/m² niestwarzający zagrożenia dla ludzi. Współczynnik określający stosunek pola

powierzchni otworu (uszkodzenia) do pola przekroju poprzecznego rurociągu a wynosi 0,2. W przedstawionych analizach przyjęto stosunek wodór/metan na poziomie 20/80 [30].



Rys. 20.3. Strefy zagrożenia dla pożaru mieszaniny wodór/metan w stosunku 20/80 (rurociąg, $a=0,2$)
Fig. 20.3. Hazard zones for hydrogen/methane mixture fire (pipeline, $a=0,2$)



Rys. 20.4. Strefy zagrożenia dla pożaru mieszaniny wodór/metan w stosunku 20/80 (rurociąg, $a=0,2$)
Fig. 20.4. Hazard zones for the fire of hydrogen/methane mixture (pipeline, $a=0,2$)

Transport mieszaniny wodór/metan w stosunku 20/80 rurociągiem o tych samych parametrach pracy spowodowałby powstanie, w przypadku awarii i pożaru, stref zagrożenia życia ludzkiego o maksymalnym zasięgu od ok. 60 m do 105 m. Są to więc zasięgi wyższe niż w przypadku transportu czystego wodoru. Wynika to m.in. z właściwości fizykochemicznych tych substancji oraz różnicy w wielkości strumienia masowego uwolnionego gazu na powierzchni otworu (uszkodzenia)

w zadanych warunkach ciśnienia i temperatury. Przykładowo dla uszkodzenia rurociągu o średnicy 150 mm i ciśnieniu 4 MPa zmieszanie wodoru z metanem w stosunku 80/20 spowoduje prawie 4-krotny wzrost strumienia masowego gazu w stosunku do strumienia masowego uwolnionego czystego wodoru. Przystawiając z kolei wartości zasięgów stref zagrożenia ze strefami powstałymi w wyniku pożaru czystego metanu uwolnionego z rurociągu o tych samych parametrach, zasięgi stref są znacznie zbliżone. Oznacza to, że dodatek wodoru na poziomie 20%, dla analizowanych parametrów rurociągu, w przypadku wystąpienia pożaru nie wpływa w sposób znaczący na konsekwencje pożaru, a więc na poziom zagrożenia dla ludzi i otoczenia. Należy jednak zwrócić uwagę, że domieszanie wodoru do metanu powoduje rozszerzenie granic palności metanu i może przyczynić się do zwiększenia samego prawdopodobieństwa wystąpienia zjawiska pożaru.

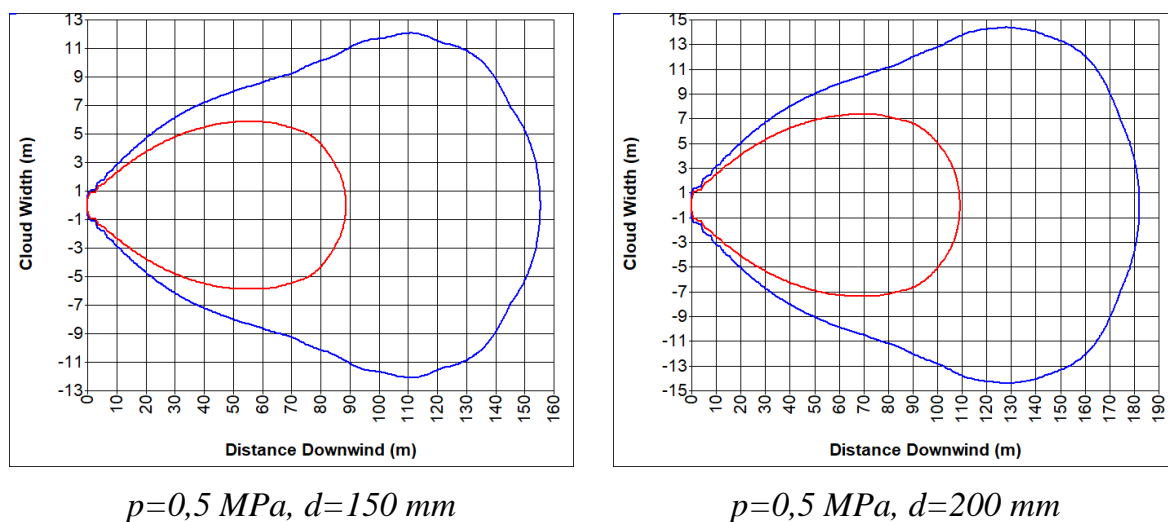
20.3.2. Amoniak i mieszanina amoniak/wodór

a) amoniak

Analizując zagrożenia związane z transportem, magazynowaniem i użytkowaniem amoniaku, należy zwrócić uwagę przede wszystkim na jego toksyczność. Amoniak, zarówno w gazowej, jak i ciekłej formie, działa drażniąco na oczy, drogi oddechowe i skórę człowieka. Efekty oddziaływania amoniaku będą zależne od poziomu koncentracji tej substancji oraz czasu narażenia na jej działania. Wieloletnie i znaczące wykorzystanie amoniaku w światowej gospodarce powoduje, że infrastruktura służąca użytkowaniu tej substancji jest wysoce rozwinięta. Substancja ta do rozproszonych po całym świecie użytkowników, tj. przede wszystkim producentów nawozów sztucznych, transportowana jest z wykorzystaniem rurociągów, statków oraz pojazdów samochodowych w postaci cystern. Do przewozu amoniaku wykorzystuje się również cysterny kolejowe. Gazowy amoniak zamienia się w ciecz przy ciśnieniu 862 kPa (125 psi). Rurociągi amoniaku zwykle (choć nie zawsze) działają pod ciśnieniem 1723 kPa (250 psi) i pozwalają, w odpowiedniej temperaturze, na przesył ciekłego amoniaku. Jak już wspomniano, największym działającym rurociągiem dedykowanym transportowi amoniaku jest rurociąg znajdujący się na terenie Rosji/Ukrainy. Istniejące w Europie mniejsze rurociągi, działające przede wszystkim na terenie zakładów przemysłowych, mają średnice od 100 do 350 mm. Pracują w zakresie ciśnień i temperatury odpowiednio: 0,2–22 MPa oraz -32–40°C. Znacząca sieć rurociągów przesyłowych amoniaku znajduje się również na terenie Stanów Zjednoczonych.

Według statystyk do ich awarii najczęściej przyczyniają się nadciśnienie, nieprawidłowości w prowadzeniu prac konserwacyjnych oraz uszkodzenia spoin [5, 19, 31].

Na rys. 20.5 przedstawiono przykładowe strefy zagrożenia, związane z niekontrolowanym uwolnieniem amoniaku z krótkiego rurociągu przesyłowego o długości 5 km oraz średnicy 150 mm i 200 mm. Parametry amoniaku w rurociągu to ciśnienie 0,5 MPa oraz temperatura 20°C (amoniak w postaci gazowej). Współczynnik określający stosunek pola powierzchni otworu (uszkodzenia) do pola przekroju poprzecznego rurociągu a wynosi odpowiednio 0,2. Krzywe na rysunku odpowiadają różnym poziomom koncentracji amoniaku, zgodnie z tabelą 20.4. Kolor czerwony – koncentracja powyżej 5000 ppm powodująca zgon ludzi, kolor niebieski – koncentracja 1000 ppm powodująca m.in. podrażnienie górnych dróg oddechowych oraz łzawienie oczu [30].



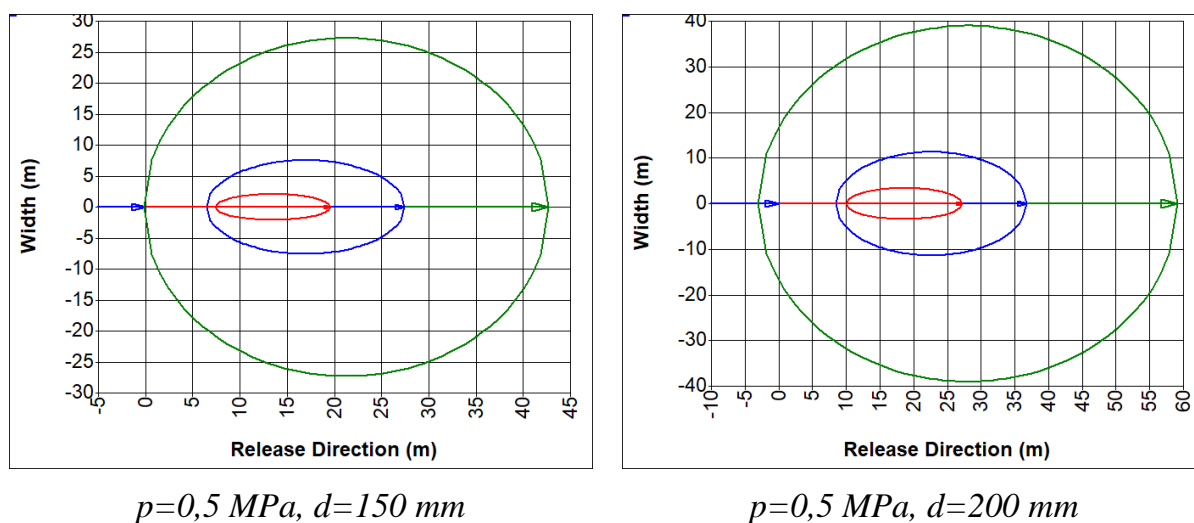
Rys. 20.5. Strefy zagrożenia dla uwolnienia amoniaku (rurociąg, $a=0,2$)

Fig. 20.5. Hazard zones for the release of ammonia (pipeline, $a=0,2$)

Strefy zagrożenia związane z koncentracją amoniaku powodującą zgony ludzi w przypadku awarii rurociągu przesyłowego o długości 5 km obejmą obszar 775 m² oraz 1198 m², odpowiednio dla średnic rurociągu równych 150 mm i 200 mm. Maksymalne zasięgi tych stref wynoszą ok. 155 metrów dla średnicy 150 mm i o ok. 30 metrów więcej dla średnicy równej 200 mm. Strefy dla niższej niebezpiecznej koncentracji, tj. 1000 ppm, powodującej podrażnienie dróg oddechowych i łzawienie oczu u ludzi obejmą maksymalny zasięg 90 i 110 metrów.

Innym rodzajem zagrożenia, związanym z niekontrolowanym uwolnieniem amoniaku w postaci gazowej może być również pożar. Amoniak jest palny w zakresie stężeń 15–28%. Przykładowe strefy zagrożenia związane z pożarem tej substancji

przedstawiono na rys. 20.6. Analizy wykonano dla tych samych założeń, co powyżej. Poszczególne krzywe na rysunkach odnoszą się do strumieni ciepła generowanych z pożaru na poziomie $37,5 \text{ kW/m}^2$, $12,5 \text{ kW/m}^2$ oraz $1,5 \text{ kW/m}^2$ [30].



Rys. 20.6. Strefy zagrożenia dla pożaru amoniaku (rurociąg, $a=0,2$)
 Fig. 20.6. Hazard zones for the fire of ammonia (pipeline, $a=0,2$)

Na powyższych wykresach można zauważyć, że strefy zagrożenia życia ludzkiego na skutek pożaru amoniaku obejmą maksymalny zasięg ok. 18 i 28 metrów, odpowiednio dla średnicy rurociągu równej 150 i 200 mm. Są to zasięgi znacznie niższe niż w przypadku pożaru wodoru, co wynika m.in. z różnic we właściwościach fizykochemicznych tych substancji oraz niższego ciśnienia dla transportu gazowego amoniaku.

b) mieszanina amoniak/wodór

Jak już wspomniano, znaczna, globalna produkcja amoniaku i jego szerokie zastosowanie powodują, że procesy jego transportu są dość dobrze opanowane. Jeden z najnowszych trendów wykorzystania amoniaku jako paliwa, m.in. przez spalanie w silniku lub do wytwarzania energii elektrycznej, lub ciepła prowadzi do sporej liczby badań i analiz dotyczących jego współspalania z innymi paliwami, np. wodorem lub metanem. Takie dodatki pozwalają na znaczące usprawnienie procesu spalania w porównaniu ze spalaniem czystego amoniaku. Mogą również wpłynąć na bezpieczeństwo procesów transportu, magazynowania i użytkowania takich mieszanek, dodanie bowiem np. wodoru do amoniaku rozszerza zakres granic palności, powodując, że poziom stężenia gazu potrzebny do powstania zjawiska

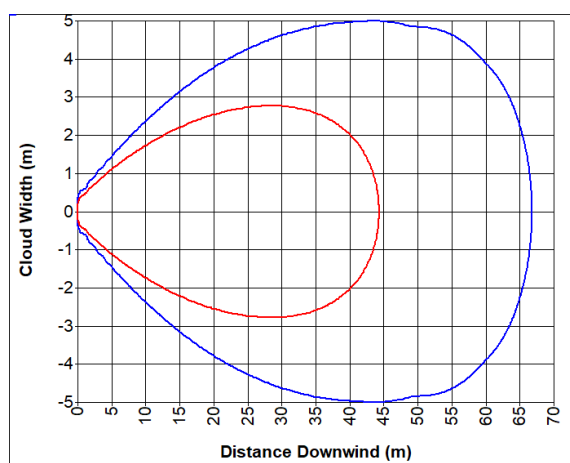
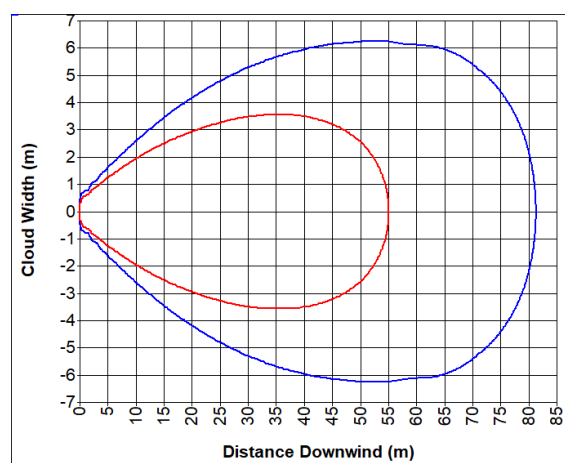
pożaru/wybuchu jest niższy. Zmianę granic palności mieszanki dla różnych stosunków amoniak/wodór przedstawiono w tabeli 20.6 [5, 20, 30].

Tabela 20.6

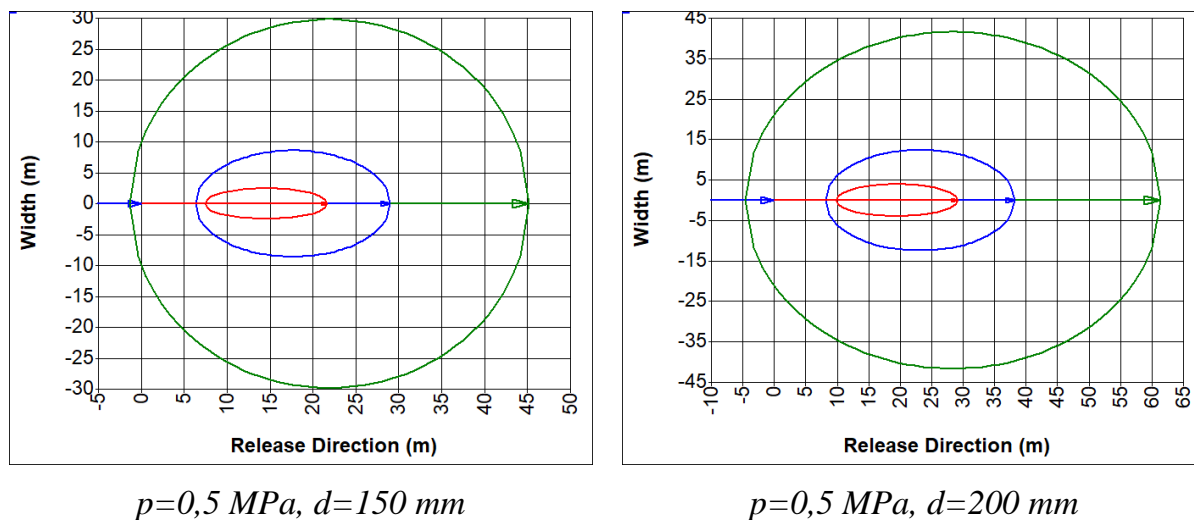
Zmiana granic palności mieszanki amoniak/wodór

NH_3/H_2	100/0	80/20	60/40	50/50	40/60	20/80	0/100
LFL	15,00%	4,07%	5,71%	6,40%	7,27%	10,00%	4,00%
UFL	28,00%	53,57%	41,67%	37,50%	34,09%	28,85%	75,00%

Na rysunkach poniżej przedstawiono zasięgi stref związanych z zagrożeniami powstałymi na skutek awarii rurociągu transportującego mieszaninę o udziałach amoniak/wodór 80/20. Analizy przeprowadzono dla rurociągu o długości 5 km oraz średnicach 150 mm i 200 mm. Współczynnik określający poziom uszkodzenia wynosi 0,2. Na rys. 20.7 przedstawiono strefy zagrożenia związane z oddziaływaniem koncentracji amoniaku na poziomach 1000 ppm oraz 5000 ppm. Natomiast na rys. 20.8 strefy zagrożenia związane ze strumieniem ciepła o wartościach 37,5 kW/m², 12,5 kW/m² oraz 1,5 kW/m² [30].

 $p=0,5 \text{ MPa}, d=150 \text{ mm}$  $p=0,5 \text{ MPa}, d=200 \text{ mm}$

Rys. 20.7. Strefy zagrożenia dla uwolnienia mieszanki amoniak/wodór (rurociąg, $a=0,2$)
 Fig. 20.7. Hazard zones for the release of ammonia/hydrogen mixture (pipeline, $a=0,2$)



Rys. 20.8. Strefy zagrożenia dla pożaru mieszaniny amoniak/wodór (rurociąg, $a=0,2$)
 Fig. 20.8. Hazard zones for ammonia/hydrogen fire (pipeline, $a=0,2$)

20.4. Podsumowanie

Każdego dnia na całym świecie realizowane są procesy wytwarzania, transportu, magazynowania i końcowego użytkowania różnych paliw. Wśród nich znajdują się zeroemisyjne paliwa w postaci wodoru i amoniaku. Oprócz wielu niewątpliwych zalet determinujących ich potencjał wykorzystania nie należy zapominać o tym, że są to substancje o właściwościach niebezpiecznych. W przypadku awarii instalacji w postaci rurociągów, zbiorników etc. ich niekontrolowane uwolnienie może skutkować m.in. pożarem lub transportem chmury substancji o niebezpiecznym dla ludzi poziomie koncentracji. Ciągły rozwój badań nad zastosowaniem tych paliw powinien więc obejmować również zagadnienia bezpieczeństwa. Prowadzone analizy pokazują bowiem, że w zależności od parametrów instalacji i warunków otoczenia konsekwencje powstałych awarii mogą być bardzo niebezpieczne dla ludzi i otoczenia, np. wysokie wartości strumienia ciepła generowanego z pożaru wodoru mogą prowadzić do utraty życia ludzi, a także zniszczenia instalacji i maszyn znajdujących się w odległości do kilkudziesięciu metrów od miejsca awarii.

Bibliografia

1. Accident Database, The National Transportation Safety Board, 2022.
2. Çeper B.A.: Use of Hydrogen-Methane Blends in Internal Combustion Engines. "Hydrogen Energy – Challenges and Perspectives", 2012.
3. Massarweh O., Al-khuzaei M., Bicer Y., Abushaikha A.S.: Blue hydrogen production from natural gas reservoirs: A review of application and feasibility. "Journal of CO₂ Utilization", Vol. 70, 2023, 102438.
4. ENTSOG, GIE, Hydrogen Europe: How to transport and store hydrogen – facts and figures, 2020.
5. Wang B., Yang C., Wang H., Hu D., Wang Y.: Effect of Diesel-Ignited Ammonia/Hydrogen mixture fuel combustion on engine combustion and emission performance, "Fuel", Vol. 331, Part 2, 2023, 125865.
6. Makaryan I.A., Sedov I.V., Salagansky E.A., Arutyunov A.V., Arutyunov V.S.: A comprehensive review on the prospects of using hydrogen–methane blends: challenges and opportunities, "Energies", 2022, 15(6), 2265.
7. The role of hydrogen and ammonia in meeting the net zero challenge, Climate Change: Science And Solutions | Briefing 4, The Royal Society, 2021.
8. Climate change: science and solutions | Briefing 4: The role of hydrogen and ammonia in meeting the net zero challenge, The Royal Society, 2021.
9. Hansen O.R.: Hydrogen and Ammonia Infrastructure. Safety and Risk Information and Guidance. Report no: PRJ11100256122r1, 2020.
10. Drozdowski W.: Wodór do wytwarzania i magazynowania energii elektrycznej. „Materiały problemowe”, Centrum Informacji o Rynku Energii 2020.
11. Starobrat A.: Praca doktorska: Nowe materiały do magazynowania wodoru oparte na skandzie, itrze i glinie: synteza i właściwości fizykochemiczne, Uniwersytet Warszawski, 2020.
12. Li H, Cao X., Liu Y., Shao Y., Nan Z., Teng L., Peng W., Bian J.: Safety of hydrogen storage and transportation: An overview on mechanisms, techniques, and challenges, "Energy Reports", Vol. 8, 2022, p. 6258-6269.
13. Gerboni R.: Compendium of Hydrogen Energy, Vol. 2: Hydrogen Storage, Distribution and Infrastructure, Elsevier, 2015.
14. The Role of Low-Carbon Fuels in the Clean Energy Transitions of the Power Sector, International Energy Agency, 2021.
15. Kuczyński S., Łaciak M., Olijnyk A., Szurlej A., Włodek T.: Thermodynamic and Technical Issues of Hydrogen and Methane-Hydrogen Mixtures Pipeline Transmission, "Energies", No. 12(3), 2019, 569.
16. Lięża K., Narloch P.: Perspektywy magazynowania wodoru z odnawialnych źródeł energii w Polsce, cz. 2. „Nowa Energia”, nr 2(88)/2023, 2023, s. 39–45.
17. Karim G.A., Wierzba I., Al-Alousi Y.: Methane-hydrogen mixtures as fuels. "International Journal of Hydrogen Energy", Vol. 21, No. 7, 1996, p. 625–631.
18. Dunikov D.O., Blinov D.V.: Use of methane-hydrogen mixtures for energy accumulation, "Journal of Physics: Conference Series", Vol. 1370, 2019, 012033.
19. Guidance for transporting ammonia by rail, Second Edition, European Fertilizer Manufacturers Association, 2007.

20. Mounaïm-Rousselle C., Bréquigny P., Dumand C., Houillé S.: Operating Limits for Ammonia Fuel Spark-Ignition Engine, "Energies", Vol. 14(14), 2021, 4141.
21. Ghavam S., Vahdati M., Wilson I.A.G., Styring P.: Sustainable Ammonia Production Processes, "Frontiers in Energy Research", Vol. 9, 2021, 580808.
22. Guidance for Guidance for inspection of and leak detection in liquid ammonia pipelines, European Fertilizer Manufacturers Association, 2008.
23. Flórez-Orrego D., Domingos M., Nakashima R., Teles M., De Oliveira Junior S.: Chapter 3: Ammonia production from syngas, Advances in Synthesis Gas Book Series: Methods, Technologies and Applications, 2022.
24. Szlęk A., Adamczyk W., Bijańska J., Wodarski K.: Amoniak jako nośnik energii, „Nowa Energia”, nr 2(88)/2023, 2023, p. 46–51.
25. Li S., Cheng C., Pu G., Chen B.: QRA-Grid: Quantitative Risk Analysis and Grid-based Pre-warning Model for Urban Natural Gas Pipeline, "International Journal of Geo-Information", Vol. 8, 2019, 122.
26. Health Effects Ammonia, The Fertilizer Institute, 2020.
27. Tretsiakova-McNally S.: Harm criteria for people and environment, damage criteria for structures and equipment, Hyresponse – European Hydrogen Emergency Response training programme for First Responders, 2016.
28. Woliński M.: Zbiornik wodoru w samochodzie. Realne zagrożenie w pożarze?, Zeszyty Naukowe SGSP 2018, Nr 65 (TOM 2)/1/2018, s. 47–61.
29. Penev M., Zuboy J., Hunter Ch.: Economic analysis of a high-pressure urban pipeline concept (HyLine) for delivering hydrogen to retail fueling stations, "Transportation Research Part D: Transport and Environment, 2019, Vol. 77, p. 92–105.
30. PHAST v6.7, DNV Software.
31. European Commission Directorate-General Environment Assessing the case for EU legislation on the safety of pipelines and the possible impacts of such an initiative, Final Report ENV.G.1/FRA/2006/0073, 2021.

21. BADANIA NAD TANIMI, NOWOCZESNYMI, ELEKTRONICZNYMI CZUJNIKAMI PYŁU W POWIETRZU

21.1. Wprowadzenie

Czyste powietrze jest fundamentalnym elementem życia i zdrowia istot żywych. W wyniku działalności człowieka coraz bardziej zanieczyszczeniu ulega otaczające ludzi powietrze. Do najbardziej istotnych zanieczyszczeń powietrza zaliczyć można mikropyły. Ich rozmiar jest tak mały, iż przenoszą one szkodliwe substancje – w tym wysoko rakotwórczy benzopiren oraz inne wielopierścieniowe węglowodory aromatyczne. Istnieje potrzeba monitorowania tego rodzaju substancji w środowisku a szczególnie w pomieszczeniach, w których obecnie człowiek przebywa najczęściej. Do monitorowania środowiska może służyć przenośna aparatura pomiarowa. Na dzisiejszym rynku oferowanych jest wiele tanich czujników elektronicznych do pomiaru zawartości pyłu w powietrzu o różnych zasadach działania. Są to czujniki przeznaczone do ciągłego monitorowania jakości powietrza. Zdecydowano się na porównanie działania wybranych typów czujników łatwo dostępnych na rynku elektronicznym w różnych warunkach pracy. Porównanie ma na celu pokazanie, który z wybranych czujników cechuje się najmniejszym błędem pomiaru. W tym celu wykonano wiele badań porównawczych w jednakowych warunkach środowiska z użyciem urządzenia referencyjnego. Wyniki porównania pokazano na wykresach słupkowych.

21.2. Monitorowanie środowiska pod kątem zawartości cząstek w powietrzu

Cząstki stałe – skrót PM (*ang. Particulate Matter*) jest to mieszanina cząstek stałych i ciekłych w powietrzu, które są na tyle małe, że nie osadzają się na powierzchni ziemi pod wpływem grawitacji. Cząstki są klasyfikowane według średnicy aerodynamicznej. Najczęściej mierzonymi frakcjami są PM_{2,5} i PM₁₀.

Fracja PM_{2,5} to drobny pył, którego średnica jest mniejsza lub równa 2,5 μm. Pyły te dostają się do układów oddechowego i krwionośnego człowieka. Frakcja PM₁₀ są to cząstki o średnicy nieprzekraczającej 10 μm. Powstają głównie w wyniku ruchu drogowego oraz we wszystkich procesach spalania i dostają się do płuc człowieka. W porównaniu z cząstkami gruboziarnistymi cząstki drobne są bogatsze w substancje toksyczne i szkodliwe, i mogą dłużej przebywać w atmosferze. Odległość ich transportu jest dłuższa i mają większy wpływ na środowisko atmosferyczne i zdrowie człowieka. Z powodu negatywnego wpływu pyłu zawieszonego na zdrowie człowieka Światowa Organizacja Zdrowia (WHO) uznaje za dopuszczalne stężenia dobowe wynoszą odpowiednio dla PM_{2,5} – 15 μg/m³ (wcześniej było to 25 μg/m³) oraz dla PM₁₀ – 45 μg/m³ (wcześniej było to 50 μg/m³) [1]. W Polsce dobowy poziom dopuszczalny pyłu zawieszonego PM₁₀ to 50 μg/m³, natomiast PM_{2,5} nie jest określony [3]. Poziom informowania, podczas którego zaleca się ograniczyć aktywność na powietrzu wynosi 100 μg/m³, a poziom alarmowy, gdzie zaleca się nieopuszczanie zamkniętych pomieszczeń jest równy 150 μg/m³ [3]. Poziom dopuszczalny jest często przekraczany, a Polska pod względem ilości pyłu PM_{2,5} w powietrzu zajmuje dziesiąte miejsce w Europie (2019) [2]. Na rys. 21.1 pokazano przedziały wartości stężenia pyłu, jakie ma Polski Indeks Jakości Powietrza dla PM_{2,5} oraz PM₁₀ [3].

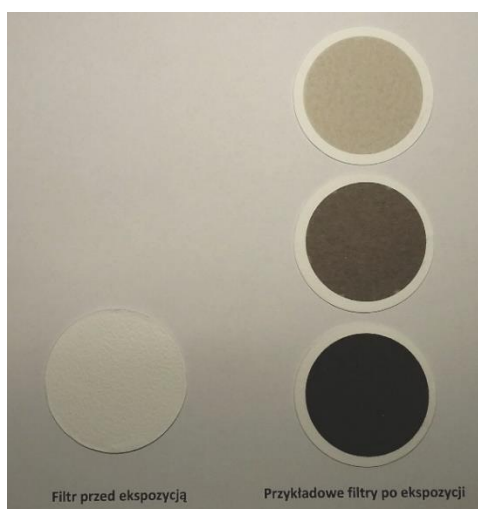
Polski indeks jakości powietrza	PM ₁₀ [μg/m ³]	PM _{2,5} [μg/m ³]
Bardzo dobry	0–20	0–12
Dobry	20–60	12–36
Umiarkowany	60–100	36–60
Dostateczny	100–140	60–84
Zły	140–200	84–120
Bardzo zły	>200	>120

Rys. 21.1. Polski Indeks Jakości Powietrza [3]
Fig. 21.1. Polish Air Quality Index [3]

21.3. Sposoby monitorowania środowiska pod kątem zawartości cząstek w powietrzu

Dostępne są dwie metody pomiaru cząstek pyłu występującego w środowisku, które są one najczęściej używane (wewnątrz i na zewnątrz budynków). Są to:

- **Metoda grawimetryczna** – bardziej nadaje się do zastosowań zewnętrznych [6]. Jest to metoda referencyjna oraz laboratoryjna, w której stosuje się specjalne filtry pomiarowe [6]. Są one codziennie ręcznie sprawdzane przez specjalistę w laboratorium, w celu określenia poziomu zapylenia powietrza. Na rys. 21.2 pokazano przykładowe filtry powietrza – czyste (lewy) oraz zanieczyszczony (prawy).



Rys. 21.2. Filtry używane w metodzie grawimetrycznej [4]

Fig. 21.2. Filters used in the gravimetric method [4]

- **Metoda automatyczna (optyczna)** – najczęściej do zastosowań wewnątrz pomieszczeń. Metoda bezobsługowa (dla urządzeń mobilnych i małych stacji pomiarowych), w której stosowane są czujniki elektroniczne. Taki czujnik ma własny obwód elektroniczny, który zapewnia odpowiednie napięcia robocze dla wbudowanych podzespołów. Powietrze jest wpuszczane przez wlot do miernika. Wentylator zapewnia ciągły ruch i wymianę powietrza. Czujniki takie są używane w przenośnych urządzeniach IAQ (*ang. Indoor Air Quality*) o działaniu ciągłym, takich jak urządzenie pokazane na rys. 21.3.



Rys. 21.3. Przenośne urządzenie pomiarowe – automatyczne [5]

Fig. 21.3. Portable measuring device – automatic [5]

21.4. Zasada działania czujników elektronicznych cząstek zawieszonych (pyłów)

Wśród elektronicznych czujników pomiarowych (montowanych w sprzęcie pomiarowym) szeroko dostępne na rynku są urządzenia oparte na źródle laserowym oraz podczerwonym.

21.4.1. Czujniki na podczerwień

Czujniki cząstek na podczerwień (starsza technologia, jako pierwsze pojawiły się w konstrukcjach czujników) dziś są stosowane głównie do pyłów przemysłowych i górniczych ze względu na niewystarczającą dokładność pomiaru. Ponieważ sygnał rozpraszania światła diody LED w podczerwieni jest słaby, więc reaguje tylko na duże cząstki, większe niż $1\mu\text{m}$ (obiekty wykrywania to duży rozmiar cząstek i pył o wysokim stężeniu). Taki czujniki nie może dokładnie zmierzyć stężenia $\text{PM}_{2,5}$, ale może wykryć tylko kurz i być wskaźnikiem zanieczyszczenia. Struktura i obwód działającego na podczerwień czujnika są stosunkowo proste. Ruch powietrza w czujniku opiera się głównie na ciepłe pochodzącym od rezystora grzejnego (brak elementów ruchomych). Gdy cząstki przechodzą przez kanał pomiarowy, to po przecięciu źródła światła LED następuje odbicie. Światłoczuły detektor odbiera odbite światło o różnym natężeniu, a następnie sygnał przechodzi przez proces wzmocnienia i przetwarzania, gdzie uzyskuje się wynik pomiaru.

21.4.2. Czujniki laserowe

Laserowy czujnik to nowsza technologia, która umożliwia dokładne mierzenie stężenia małych cząstek (większych również). Laserowy czujnik cząstek oparty jest na pomiarze ilościowym, może wykrywać cząstki już od rozmiaru $0,3\ \mu\text{m}$, może dokładnie mierzyć wartość $\text{PM}_{1,0}$, $\text{PM}_{2,5}$, PM_{10} , z dużą dokładnością. Budowa i obwód czujnika cząstek działającego na zasadzie lasera są stosunkowo skomplikowane. Źródłem światła jest dioda laserowa. Próbkowane powietrze jest przepychane przez wentylator lub dmuchawę i przepuszczane przez skomplikowane zaprojektowany kanał powietrzny, w celu wykrycia cząstek. Kiedy drobne cząstki w powietrzu dostaną się do obszaru, w którym znajduje się wiązka lasera, laser zostanie rozproszony; światło rozproszone jest emitowane w przestrzeni w zakresie

360°, a fotodetektor jest umieszczany w odpowiedniej pozycji do odbioru światła rozproszonego – wykorzystywany jest efekt fotoelektryczny fotodetektora. Po wzmocnieniu sygnału prądowego i przetworzeniu go przez obwód wzmacniacza operacyjnego, można uzyskać stężenie drobnych cząstek. Sygnał wyjściowy może być przetworzony na wiele sposobów i jest kompatybilny z komputerem. Dlatego, że laserowy czujnik ma stosunkowo złożoną strukturę jego cena rynkowa jest większa od czujników podczerwonych [12]. Taki czujnik może być wbudowany w domowe (samochodowe, ręczne) detektory powietrza i oczyszczacze powietrza.

21.5. Badania wybranych czujników do pomiaru pyłu zawieszonego w powietrzu

Badania rozpoczęto od wyboru miernika referencyjnego – wybrano urządzenie BQ20 firmy Troteq [7]. Urządzenie zostało sprawdzone przez producenta, zgodnie z normą ISO 21501-4 [13]. Kalibracja producenta wykazała, że maksymalna niepewność pomiaru urządzeniem w każdej kategorii pyłu (PM_{2,5} i PM₁₀) mieści się w zakresie 16% wartości mierzonej. Na rynku są urządzenia charakteryzujące się mniejszym błędem pomiaru, lecz wybór miernika został podyktowany zasobami sprzętowymi katedry. Na rys. 21.4 pokazano miernik BQ20.



Rys. 21.4. Zdjęcie miernika BQ20 [7]
Fig. 21.4. Photo of the BQ20 meter [7]

Wybrano kilka najnowszych czujników elektronicznych dostępnych na terenie Polski oraz używanych do produkcji osobistych urządzeń do pomiaru zapylenia powietrza (oczyszczacze powietrza, przenośne mierniki pyłu, stacjonarne mierniki systemowe i sieciowe). Wybrano czujniki, które charakteryzują się następującymi parametrami.

Czujnik pyłów zawieszonych SDS011 produkcji NOVA FITNESS CO.LTD. z laserową zasadą pomiaru. Pomiaru frakcji to PM_{2,5} oraz PM₁₀. Błąd pomiaru to

15% wartości pomiaru $\pm 10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (wartość stała). Aktualna cena to około 160 zł [12]. Na rys. 21.5 pokazano wygląd zewnętrzny czujnika SDS011.



Rys. 21.5. Czujnik SDS011 – wygląd zewnętrzny [8]

Fig. 21.5. SDS011 sensor – appearance [8]

Czujnik pyłów zawieszonych SDS018 produkcji NOVA FITNESS CO.LTD z laserową zasadą pomiaru. Pomiary frakcji to PM_{2,5} oraz PM₁₀. Błąd pomiaru to 15% wartości pomiaru $\pm 10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (wartość stała). Aktualna cena to około 150 zł [12]. Na rys. 21.6 pokazano wygląd zewnętrzny czujnika SDS018.



Rys. 21.6. Czujnik SDS018 – wygląd zewnętrzny [9]

Fig. 21.6. SDS018 sensor – appearance [9]

Czujnik pyłów zawieszonych ZH03b produkcji WISEN SENSOR z laserową zasadą pomiaru. Czujnik bardzo często wykorzystywany do produkcji aparatury pomiarowej. Pomiary frakcji to PM_{2,5} oraz PM₁₀. Błąd pomiaru nie jest zdefiniowany przez producenta. Aktualna cena to około 160 zł [12]. Na rys. 21.7 pokazano wygląd zewnętrzny czujnika ZH03b.



Rys. 21.7. Czujnik ZH03b – wygląd zewnętrzny [10]

Fig. 21.7. ZH03b sensor – appearance [10]

Czujnik pyłów zawieszonych PMS7003 produkcji PLANTOWER z laserową zasadą pomiaru. Pomiary frakcji to PM1,0, PM2,5 oraz PM10. Błąd pomiaru to $\pm 10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ dla pomiaru $0\text{--}100 \mu\text{g}/\text{m}^3$ i $\pm 10\%$ wartości mierzonej dla $100\text{--}500 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Aktualna cena to około 110 zł [12]. Na rys. 21.8 pokazano wygląd zewnętrzny czujnika PMS7003.



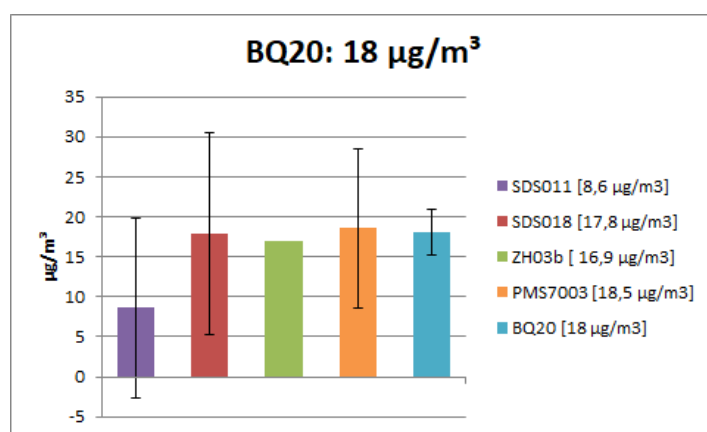
Rys. 21.8. Czujnik PMS7003 – wygląd zewnętrzny [11]

Fig. 21.8. PMS7003 sensor – appearance [11]

21.6. Wyniki badań zestawu czujników w środowisku zastanym

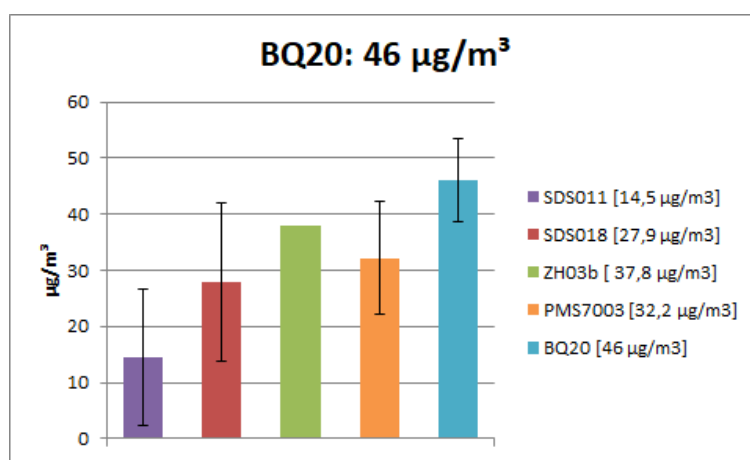
W celu porównania oraz sprawdzenia działania czujników zbudowano specjalny układ elektroniczny, który umożliwia równoległe zbieranie danych z zestawu czujników. Zestaw umieszczano w różnych zastanych środowiskach, w pomieszczeniach zamkniętych, gdzie zawartość pyłu znacznie się różniła (pracownia lutowicza, stary strych, piwnica, pokój dzienny, sypialnia przed i po odkurzaniu). Razem z zestawem umieszczano miernik referencyjny tak, aby czerpał

powietrze z podobnego obszaru. Każdy pomiar testowy trwał kilkadziesiąt sekund. Wynikiem końcowym była średnia zmierzona zawartość pyłów zawieszonych w powietrzu (PM_{2,5} oraz PM₁₀). Na rysunkach 21.9, 21.10 i 21.11, w postaci wykresów słupkowych, pokazano wybrane wyniki pomiarów pyłu frakcji PM_{2,5}. Zaznaczono także dokładność pomiaru każdego czujnika oraz miernika referencyjnego.



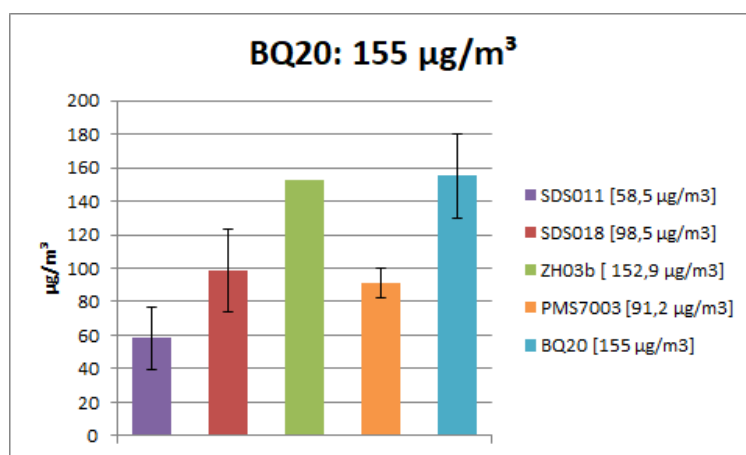
Rys. 21.9. Wyniki pomiarów zawartości pyłu PM_{2,5} około 20 ug/m³

Fig. 21.9. Results of measurements of PM_{2.5} dust content of about 20 ug/m³



Rys. 21.10. Wyniki pomiarów zawartości pyłu PM_{2,5} około 50 ug/m³

Fig. 21.10. Results of measurements of PM_{2.5} dust content of about 50 ug/m³

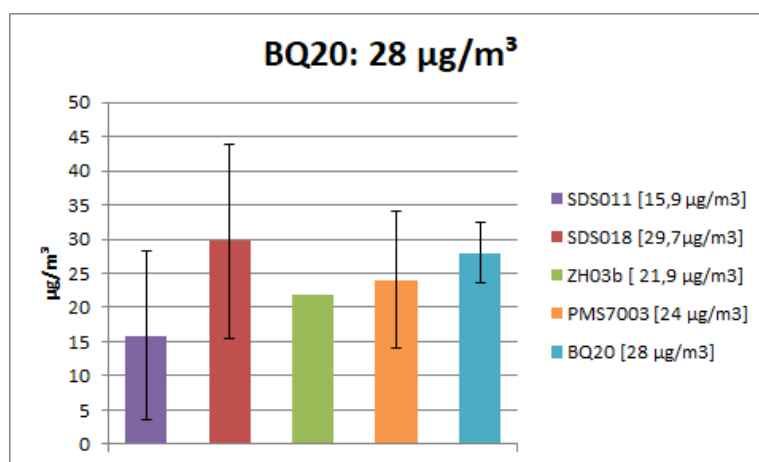


Rys. 21.11. Wyniki pomiarów zawartości pyłu $\text{PM}_{2,5}$ około $150 \mu\text{g}/\text{m}^3$

Fig. 21.11. Results of measurements of $\text{PM}_{2.5}$ dust content of about $150 \mu\text{g}/\text{m}^3$

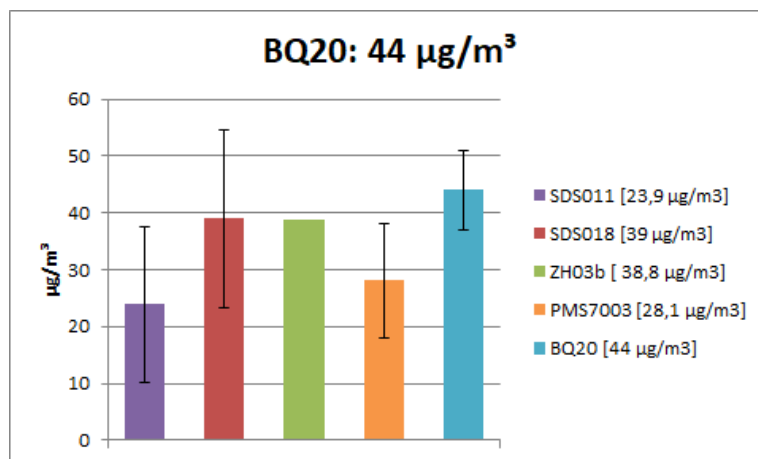
Jak widać wskazania badanych czujników podążają za referencją. Na rys. 21.9 można zauważyć że w przypadku pomiarów wynoszących około $20 \mu\text{g}/\text{m}^3$ wartość zmierzona przez czujnik SDS011 jest o około o 50% niższa względem urządzenia referencyjnego, a pomiary czujnikiem PMS7003 są zbliżone do tych, uzyskanych przez miernik BQ20. Pomiary wykonane przez czujniki SDS018 i ZH03b mieszczą się w zakresie 35% różnicy względem wartości referencyjnej. Widać więc, że wszystkie wskazania badanych urządzeń mieszczą się w granicach deklarowanych błędów. Trochę inaczej przedstawia się sytuacja na rys. 21.10 oraz 21.11, gdzie czujnik SDS011 notuje dużo niższe wskazanie aniżeli referencyjny. Bardzo dobrze natomiast zachowuje się czujnik ZH03b.

Na rysunkach 21.12, 21.13 i 21.14 natomiast pokazano wybrane wyniki pomiarów pyłu frakcji PM_{10} . Zaznaczono także dokładność pomiaru każdego czujnika oraz miernika referencyjnego.



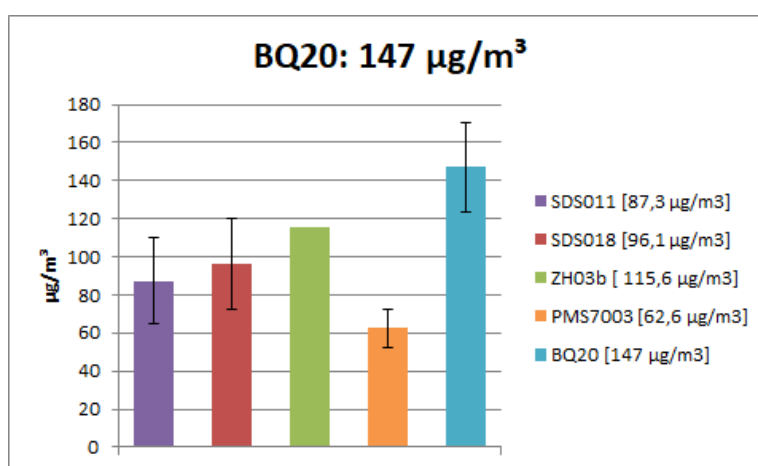
Rys. 21.12. Wyniki pomiarów zawartości pyłu PM_{10} około $30 \mu\text{g}/\text{m}^3$

Fig. 21.12. Results of measurements of PM_{10} dust content of about $30 \mu\text{g}/\text{m}^3$



Rys. 21.13. Wyniki pomiarów zawartości pyłu PM10 około 50 ug/m³

Fig. 21.13. Results of measurements of PM10 dust content of about 50 ug/m³



Rys. 21.14. Wyniki pomiarów zawartości pyłu PM10 około 150 ug/m³

Fig. 21.14. Results of measurements of PM10 dust content of about 20 ug/m³

W badaniach frakcji PM10 również czujnik ZH03b notuje wskazania zbliżone do miernika referencyjnego. Na rys. 21.12 można zobaczyć wskazania czujnika SDS018, przewyższając one wskazania miernika wzorcowego. Przy wartości około 50 ug/m³ czujniki SDS018 oraz ZH03b wykazywały podobne zachowanie; niewiele niżej od miernika referencyjnego.

21.7. Podsumowanie

Wyniki pomiarów w porównaniu z miernikiem referencyjnym BQ20 były następujące. Czujnik SDS011 charakteryzował się największym odchyleniem od wartości referencyjnej, odpowiednio dla frakcji PM2,5 (od 50% do 70%) oraz dla

frakcji PM₁₀ (od 40% do 60%). Czujnik SDS018, w przypadku pomiarów do około 20 µg/m³, w znaczny sposób zawyżał wartości pomiaru. Dla wyższych stężeń mieścił się w zakresie dla frakcji PM_{2,5} (od 25% do 45%) oraz dla frakcji PM₁₀ (od 15% do 35%). Czujnik ZH30b charakteryzował się pomiarami o wartości podobnej do referencyjnej, szczególnie w przypadku frakcji PM_{2,5}. Czujnik PMS7003 charakteryzował się błędem do 40% w przypadku frakcji PM_{2,5} oraz do ok. 55% w przypadku frakcji PM₁₀. Wszystkie testowane czujniki miały proporcjonalnie mniejszą wartość w stosunku do miernika Trotec BQ20 (wymagana kalibracja i korekta). Pomiary są powtarzalne, a błędy pomiaru (w większości przypadków) proporcjonalne do wartości mierzonej. Wadą czujników elektronicznych jest mniejsza dokładność w stosunku do metody referencyjnej.

Podsumowując, czujnik WISEN ZH30b – zwycięzca w badaniach – charakteryzował się najmniejszym błędem pomiaru, choć producent nie deklaruje jego niepewności. Prawdopodobnie stąd wynika popularność jego zastosowań w aparaturze pomiarowej. Z badań wynika także, że wilgotność powietrza wpływa na dokładność pomiarów, ponieważ cząsteczki wody wielkością są podobne do pyłu znajdującego się w powietrzu. Dzięki swoim rozmiarom i małemu poborowi energii czujniki stosowane do pomiarów automatycznych mogą być przenośne. Mimo dużych wartości błędów pomiarowych czujniki, po uprzednim sprawdzeniu, mogą być stosowane w mało wymagających aplikacjach.

Bibliografia

1. WHO global air quality guidelines 2021. Particulate matter (PM_{2.5}, PM₁₀), ozone, nitrogen dioxide, sulfur dioxide and carbon monoxide.
2. IQAir – 2019 World air quality report, <https://www.iqair.com/world-most-polluted-cities/world-air-quality-report-2019-en.pdf>.
3. Informacje zdrowotne - Indeks Jakości Powietrza – GIOŚ (gios.gov.pl).
4. Pomiary pyłu zawieszonego w powietrzu. Jak się to robi? – GIOŚ (gios.gov.pl) 2023; <https://powietrze.gios.gov.pl/pjp/content/show/1000919?lang=en>.
5. Miernik jakości powietrza Webber SP86, <https://www.euro.com.pl/oczyszczacze-powietrza/webber-sp86.bhtml>.
6. Janas S.: Pomiar zanieczyszczeń powietrza pyłem zawieszonym PM₁₀, PM_{2,5} z wykorzystaniem metody grawimetrycznej, RADWAG – wagi elektroniczne – laboratorium badawcze.
7. Witryna internetowa producenta miernika pyłu Troteq BQ20; <https://pl.trotec.com/produkty-i-uslugi/mierniki/jakosc-powietrza/licznikczastek/miernik-czastek-bq20/>.

8. Dokumentacja czujnika SDS011: <https://nettigo.pl/attachments/398>.
9. Dokumentacja czujnika SDS018: <http://inovafitness.com/en/a/chanpinzhongxin/97.html>.
10. Dokumentacja czujnika ZH03b: <https://datasheetspdf.com/pdf-file/1415559/Winsen/ZH03B/1>.
11. Dokumentacja czujnika PMS7003: [https://download.kamami.pl/p564008-PMS7003%20series%20data%20manua English V2.5.pdf](https://download.kamami.pl/p564008-PMS7003%20series%20data%20manua%20English%20V2.5.pdf).
12. Sklepy dla elektroników : <https://nettigo.pl/>, <https://botland.com.pl/>, <https://kamami.pl/>, 2023.
13. ISO 21501-4:2018. Determination of particle size distribution – Single particle light interaction methods – Part 4: Light scattering airborne particle counter for clean spaces. <https://www.iso.org/standard/58073.htm>

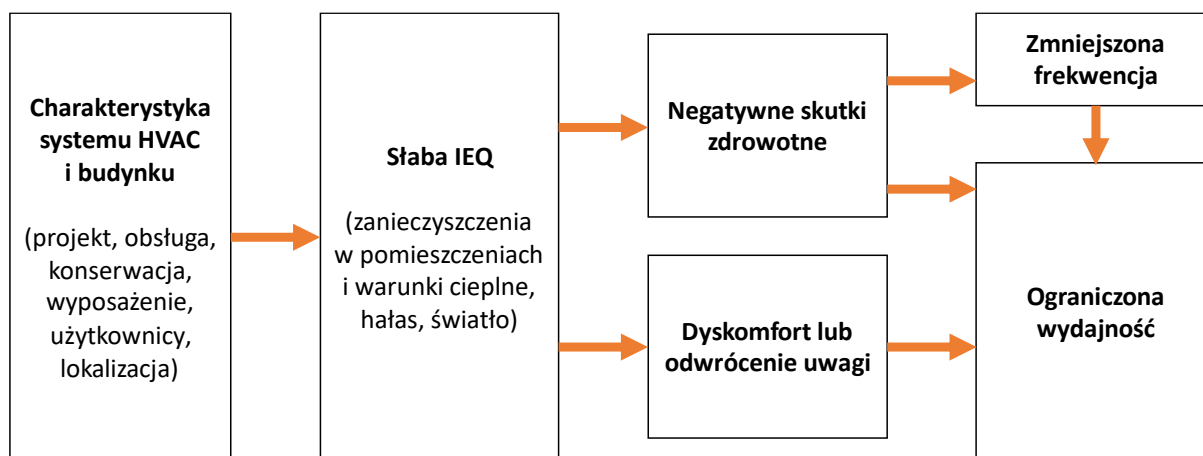
22. CASE STUDY: ZALEŻNOŚCI MIĘDZY JAKOŚCIĄ POWIETRZA WEWNĘTRZNEGO A FREKWENCJĄ UCZNIÓW SZKOŁY PODSTAWOWEJ

22.1. Wprowadzenie

Środowisko cieplne oraz jakość powietrza wewnętrznego wpływają na zdrowie, komfort oraz wydajność pracy [1–3]. Wpływ różnych aspektów środowiska wewnętrznego na wydajność pracy może być zarówno bezpośredni, jak i pośredni [4]. Termin „jakość środowiska wewnętrznego” (IEQ – z ang. *indoor environmental quality*) odnosi się do zanieczyszczeń w pomieszczeniach (w tym zanieczyszczeń biologicznych, chemicznych lub cząstek pyłowych) i warunków cieplnych (temperatura i wilgotność powietrza, średnia temperatura promieniowania, prędkość powietrza), a także hałasu, warunków oświetleniowych i zapachów.

Wskaźniki absencji ze względów chorobowych można uznać za „terenowy” wskaźnik wpływu środowiska wewnętrznego na wydajność pracy ludzi [5, 6]. Rysunek 22.1 pokazuje różne, hipotetyczne powiązania przyczynowe, przez które słaba IEQ może pogorszyć wyniki uczniów w szkołach oraz obniżyć ich frekwencję [4]. Właściwości i warunki pracy systemów ogrzewania, wentylacji i klimatyzacji (HVAC – z ang. *heating, ventilation and air-conditioning*) oraz budynków mają duży wpływ na IEQ. Czynniki IEQ mogą wpływać na stan zdrowia uczniów (oraz nauczycieli), a to z kolei może wpływać na wyniki uczniów bezpośrednio w trakcie trwania zajęć lub na frekwencję. Czynniki IEQ mogą bezpośrednio wpływać na wydajność pracy uczniów przez dyskomfort lub rozproszenie ich uwagi przez czynniki cieplne, wizualne, akustyczne lub węchowe, a to będzie skutkowało obniżoną wydajnością pracy nauczycieli oraz uczenia się dzieci. Ponadto znaczenie ma jakość powietrza wewnętrznego. Niezależne badania naukowe wykazują, że stężenie CO₂ na poziomie typowo rejestrowanym w budynkach ma negatywny wpływ na funkcje poznawcze [7–9]. Allen i in. wykazali, że całodzienna ekspozycja na stężenie rzędu 1000 ppm przyczynia się do systematycznego spadku wydajności w testach decyzyjnych [9]. Testy psychologiczne i neurobehawioralne wykazały, że obniżenie

stężenia CO₂ w salach lekcyjnych do wartości poniżej 1000 ppm znacząco poprawia czas reakcji, koncentrację i uwagę oraz rozpoznawanie i pamięć [10–12].



Rys. 22.1. Hipotetyczne związki przyczynowe dotyczące jakości środowiska wewnętrznego (IEQ) w szkołach z wynikami nauczania i frekwencją uczniów [4]

Fig. 22.1. Hypothetical causal relationships of indoor environment quality (IEQ) in schools with learning outcomes and student attendance [4]

Nieobecność uczniów na lekcjach skraca czas, w którym mogą bezpośrednio werbalnie i wizualnie pozyskiwać informacje od nauczyciela, co może powodować utrudnienia oraz zaległości w nauce. Ponadto ponieważ w wielu krajach finansowanie szkoły jest często częściowo powiązane z frekwencją, więc zmniejszona frekwencja może zmniejszyć finansowanie szkoły, a tym samym osłabić zdolność szkoły do zapewnienia dobrego środowiska uczenia się, zarówno pod względem fizycznym, jak i pedagogicznym. Środowisko wewnętrzne w szkołach może powodować skutki zdrowotne, które bezpośrednio upośledzają koncentrację lub pamięć (np. skutki neurologiczne) lub powodować inne skutki zdrowotne, które pośrednio wpływają na uczenie się. Na przykład zanieczyszczenia w pomieszczeniach mogą zaostrzać choroby, takie jak astma lub alergia, które powodują objawy chorobowe lub absencję, co z kolei utrudnia naukę lub prowadzi do stosowania leków, które pogarszają wydajność. Astma jest główną przyczyną absencji szkolnych z powodu chorób przewlekłych – szacuje się, że astma odpowiada za 20% nieobecności w szkołach podstawowych i średnich [13].

W kilku badaniach sprawdzano, czy zwiększenie wydatku wentylacyjnego w szkołach zmniejsza absencję uczniów ze względów chorobowych. Simons i in. ocenili powiązania między warunkami technicznymi budynków szkolnych w Nowym Jorku (2751 obiektów szkolnych) a absencją na poziomie 90 percentyla lub powyżej [14]. Wykazano, że absencja uczniów była związana m.in. z widoczną pleśnią (iloraz szans [OR]=2,22; 95% przedział ufności [CI]=1,34; 3,68), wilgotnością (OR=3,07;

95% CI=1,37; 6,89) oraz słabą wentylacją (OR=3,10; 95% CI=1,79; 5,37). Zaobserwowano również, że szkoły w dzielnicach o niższym statusie społeczno-ekonomicznym oraz szkoły, do których uczęszczali młodszy uczniowie wykazywały najsilniejsze związki między złymi warunkami budowlanymi a absencją. Shendell i in., na podstawie badań w 434 amerykańskich szkołach, stwierdzili, że roczna nieobecność uczniów spadła o 0,5–0,9%, gdy stężenie CO₂ w salach lekcyjnych obniżone zostało o 1000 ppm [15]. Zdecydowanie większy efekt został zaobserwowano przez Gaihre i in. [16]. W badaniach tych uwzględniono 60 sal lekcyjnych w szkołach podstawowych z wentylacją naturalną zlokalizowanych w Szkocji. Średnie stężenia CO₂ (z 3–5 dni pomiarowych) odniesiono do średniej rocznej frekwencji. Wykazano, że wzrost stężenia CO₂ już o 100 ppm wiązał się ze zmniejszeniem rocznej frekwencji o 0,2% (0,04; 0,4), co w przybliżeniu odpowiada połowie dnia zajęć szkolnych rocznie. Zaobserwowano również, że temperatura i wilgotność względna powietrza nie były związane ani z frekwencją, ani z osiągnięciami w nauce.

Celem przedstawionych badań była długoterminowa analiza i ocena IAQ w wybranej szkole podstawowej oraz ocena jej wpływu na frekwencję uczniów. Badania uwzględniały pomiary parametrów cieplnych powietrza wewnętrznego (tj. temperatury oraz wilgotności względnej powietrza), stężenia CO₂, poziomu zapylenia frakcją pyłu zawieszonego (PM2.5, PM10) oraz analizę ilościową poziomu zanieczyszczeń mikrobiologicznych.

22.2. Metodyka badań

Badania prowadzono w 90-letnim budynku szkoły podstawowej zlokalizowanej w Knurowie (woj. śląskie). Jest to obiekt trzykondygnacyjny wraz z suteroną. W szkole działa wentylacja naturalna. Sale mają okna plastikowe, wyposażone w nawiewniki okienne. Pomiary przeprowadzono w czterech wybranych salach lekcyjnych, po jednej sali na każdą kondygnację: S7 – w suterenie, S21 – na parterze (klasa integracyjna), S37 – na I piętrze (klasa edukacji wczesnoszkolnej) oraz S55 – sala na II piętrze (pracownia biologiczna). Okres pomiarowy trwał od 07.02.2023 do 06.06.2023. Analizie poddano dane zarejestrowane w godzinach lekcyjnych, tj. od 8:00 do 16:00 w powszechnie dni tygodnia.

Pomiary ciągłe parametrów IAQ uwzględniały pomiar stężenia CO₂ oraz temperatury i wilgotności powietrza z krokiem 5-minutowym. W okresie do

27.04.2023 pomiary wykonano przy użyciu czujników HT2000 (HTi, Chiny), później zaś z wykorzystaniem miernika HOBO MX1102A (Onset, Stany Zjednoczone). Informacje o dokładnościach pomiarowych przedstawiono w tabeli 22.1. Czujniki zostały skalibrowane przed rozpoczęciem pomiarów. Lokalizację punktów pomiarowych dobrano tak, by były to miejsca przewiewne i nieosłonięte, z ograniczonym dostępem dla dzieci (rys. 22.2).

Tabela 22.1

Zestawienie dokładności pomiarowych

Parametr	Miernik	Zakres pomiarowy	Dokładność
Stężenie dwutlenku węgla	HOBO	0–5000 ppm	±50 ppm +5% mierzonej wartości
	HT2000	0–10000 ppm	
Wilgotność względna powietrza	HOBO	0–100% RH	±2% RH
	HT2000		±3% RH
Temperatura powietrza	HOBO	0–50°C	±0,2°C
	HT2000	-10–70°C	±0,6°C



Rys. 22.2. Umieszczenie czujników pomiarowych na przykładzie sali S21 (parter)

Fig. 22.2. Location of measurement sensors on the example of classroom S21 (ground floor)

Szkoła znajduje się na skrzyżowaniu dwóch ulic o dużym natężeniu ruchu, co może mieć znaczący wpływ na poziom stężenia pyłu zawieszonego w powietrzu wewnętrznym oraz zewnętrznym. Zawartość pyłów zawieszonych w powietrzu została zmierzona aparatem DustTrak™ II Aerosol Monitor 8532 (TSI, Stany Zjednoczone). Pomiary przeprowadzono dla frakcji PM_{2.5} oraz PM₁₀ z dokładnością ±0,1% odczytu

lub $0,001 \text{ mg/m}^3$ (w zależności od tego, która wartość jest większa). Próbki pobierano z powietrza wewnętrznego oraz z powietrza atmosferycznego, celem wyznaczenia współczynnika Indoor/Outdoor (I/O). Natężenie przepływu ustalono zgodnie z zaleceniami na wartość $3 \text{ dm}^3/\text{min}$. Czas trwania pomiaru każdorazowo wynosił 5 min. Każdorazowo przed przystąpieniem do oznaczeń przeprowadzono pomiar „0”, w celu kalibracji czujnika. Pomiary powietrza wewnętrznego odbywały się przy obecności dzieci oraz nauczycieli w klasach, a także przy zamkniętych oknach i drzwiach.

Do długoterminowej obserwacji jakości powietrza zewnętrznego wykorzystano aparaturę pomiarową zainstalowaną na dachu budynku, w ramach programu Edukacyjnej Sieci Antysmogowej (ESA) [17]. W systemie rejestrowane są 5-minutowe, średnie wartości stężenia pyłów PM10 i PM2.5 oraz temperatura i wilgotność powietrza.

Ze względu na charakter użytkowania, sale S7 (klasa integracyjna) oraz S37 (sala edukacji wczesnoszkolnej) były wykorzystywane w sposób ciągły przez jedne klasy. W sali S37 docelowo przebywa 23 uczniów i dwóch nauczycieli, natomiast w sali S21 kształcą się 20 uczniów pod opieką jednego nauczyciela. Dzięki uprzejmości dyrekcji szkoły uzyskano zanonimizowane dane dotyczące frekwencji uczniów z tych dwóch klas w poszczególnych dniach całego okresu pomiarowego. Pozwoliło to na ocenę wpływu parametrów jakości powietrza na zdrowie uczniów.

Analizy przeprowadzono przy użyciu oprogramowania R w wersji 4.1.1 [18]. Do oceny stopnia podobieństwa między zmiennymi i oceny istotności zależności między nimi wykorzystano współczynnik korelacji rang Spearmana. Wykresy przygotowano za pomocą „GGplot2” [19].

22.3. Wyniki badań

22.3.1. Długoterminowe pomiary warunków cieplnych i stężenia CO₂

Na rys. 22.3 przedstawiono czasowe przebiegi stężenia CO₂ w poszczególnych salach lekcyjnych dla przykładowego tygodnia pomiarowego (27–31.03.2022). Wzrost stężenia CO₂ w salach był od ok. godziny 8:00, gdy rozpoczynały się lekcje. Główny spadek rozpoczynał się ok. godz. 14:00–15:00, kiedy kończyło się większość lekcji. Niższe spadki stężenia CO₂ rzędu 300–500 ppm można zaobserwować również w czasie przerw. Zmiany stężenia CO₂ są skorelowane ze zmianami temperatury

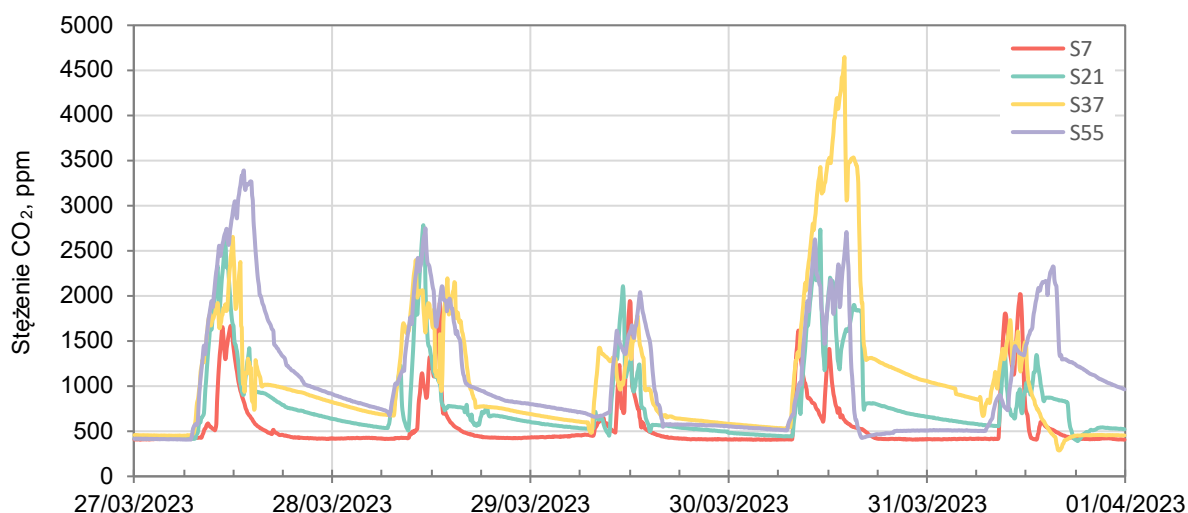
powietrza ($p < 0,001$, $r_s = 0,28$) oraz wilgotności względnej powietrza ($p < 0,001$, $r_s = 0,42$).

Najniższe wartości stężenia CO₂ zarejestrowano w sali S7 (w suterenie). Była to klasa najrzadziej wykorzystywana do prowadzenia lekcji. W trakcie zajęć stężenie wzrastało do wartości rzędu 1500–2000 ppm, a poza lekcjami było zbliżone do wartości stężenia CO₂ na zewnątrz (ok. 450 ppm). Sala ta cechowała się również najmniejszymi, dobowymi zmianami temperatury powietrza (ok. 1 K, rys. 22.4).

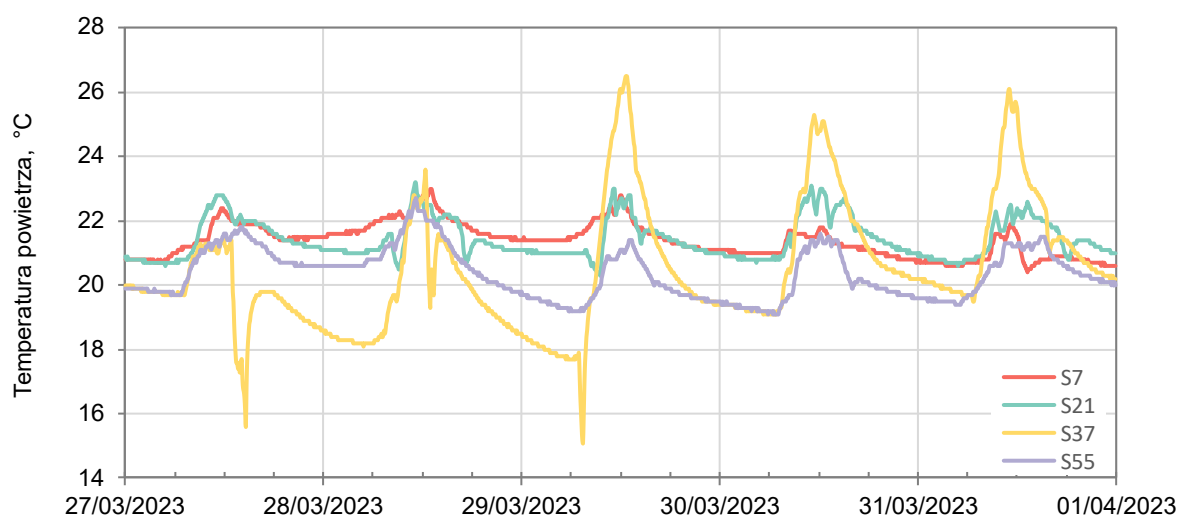
W sali S21 (klasa integracyjna na parterze) stężenie CO₂ bardzo szybko wzrastało powyżej 1000 ppm w trakcie lekcji. Maksymalne wartości dwutlenku węgla w tej klasie utrzymywały się na poziomie ok. 2500 ppm. Dzielne zmiany temperatury powietrza były konsekwentne na przestrzeni tygodni: poza lekcjami temperatura utrzymywała się na poziomie ok. 21°C i wzrastała o 2 K w trakcie lekcji.

Dzielne zmiany stężenia CO₂ oraz temperatury powietrza wskazują, że sale S37 oraz S55 są wykorzystywane przez najdłuższy okres. W klasie S37 odnotowano najwyższe wartości parametrów środowiskowych spośród wszystkich analizowanych pomieszczeń. Zarejestrowane stężenia CO₂ sięgały wartości rzędu 4500 ppm, co jest ponadczterokrotnym przekroczeniem wartości rekomendowanych dla sal lekcyjnych. W sali S37 odnotowano również największe dobowe zmiany temperatury powietrza, które były rzędu 6–10 K. Tak intensywne zmiany parametrów mogą wskazywać na dość intensywne wietrzenie sali w godzinach popołudniowo-wieczornych, jak również na duże wewnętrzne zyski ciepła oraz zanieczyszczeń powietrza w ciągu dnia.

W przypadku klasy S55 najwyższe wartości CO₂ sięgały poziomu ok. 3500 ppm. Dobowe zmiany temperatury wynosiły ok. 2 K, podobnie jak w klasie S21. W sali S55 jednak zarejestrowane temperatury powietrza są ok. 1–1,5 K niższe, co może świadczyć o większych stratach ciepła w tej sali lub niższych nastawach systemu grzewczego.

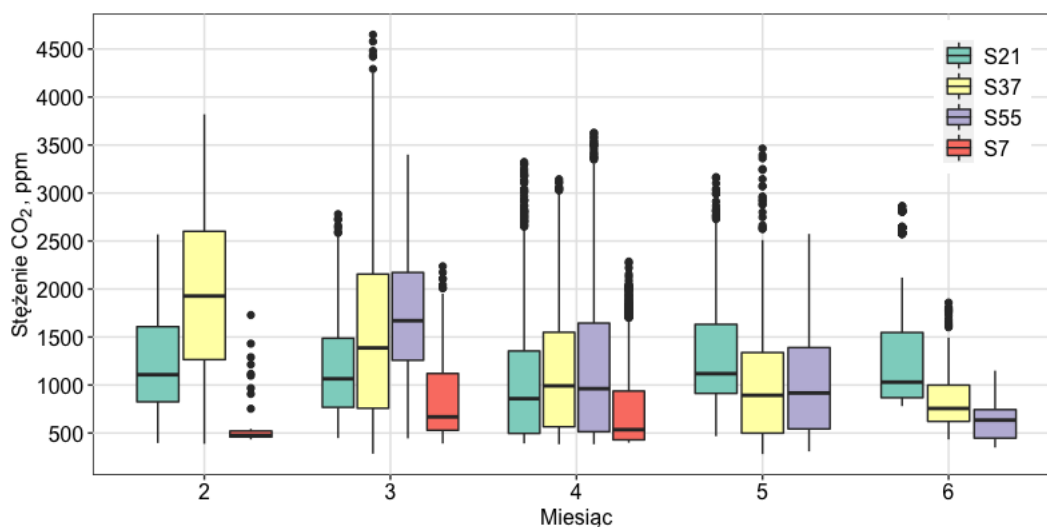


Rys. 22.3. Czasowe przebiegi stężenia CO₂ w badanych klasach szkolnych, w wybranym tygodniu
 Fig. 22.3. Time courses of CO₂ concentration in the studied classrooms, in a selected week



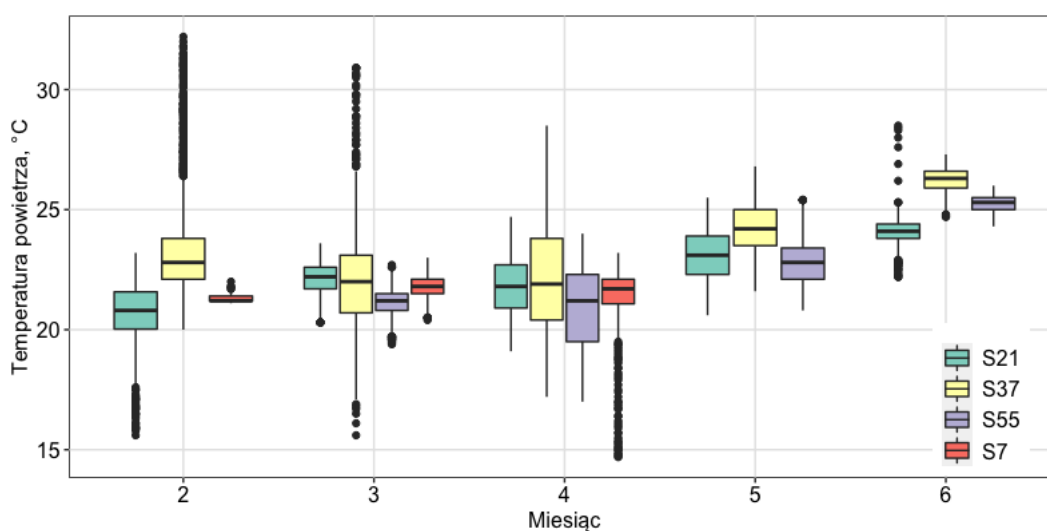
Rys. 22.4. Czasowe przebiegi temperatury w badanych klasach szkolnych, w wybranym tygodniu
 Fig. 22.4. Time courses of air temperature in the studied classrooms in a selected week

Rysunki 22.5 i 22.6 przedstawiają jak zmieniał się rozkład statystyczny zarejestrowanych wartości stężenia CO₂ oraz temperatury powietrza w godzinach lekcyjnych na przestrzeni poszczególnych miesięcy. Ogólne tendencje są zbieżne z przedstawionymi powyżej trendami dziennymi. Wartość mediany dla stężenia dwutlenku węgla w S21 konsekwentnie utrzymuje się na poziomie 850–1100 ppm, z maksymalnymi wartościami sięgającymi 2500 ppm. W przypadku sal S37 oraz S55 można zaobserwować lekką tendencję spadkową wraz kolejnymi miesiącami. Obserwacja ta jest zbieżna z tendencją wzrostową wartości temperatury powietrza, którą można zaobserwować we wszystkich salach lekcyjnych od kwietnia do czerwca.



Rys. 22.5. Rozkład statystyczny stężeń CO₂ zmierzonych w ciągu godzin lekcyjnych, w zależności od sali lekcyjnej i miesiąca pomiarowego

Fig. 22.5. Statistical distribution of CO₂ concentrations measured within school hours, depending on the classroom and measurement month



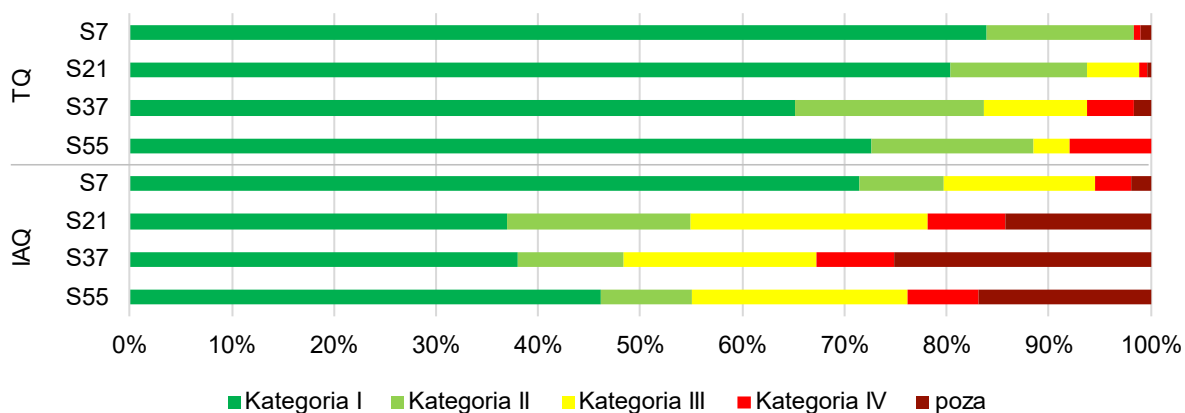
Rys. 22.6. Rozkład statystyczny temperatury powietrza zmierzonej w ciągu godzin lekcyjnych, w zależności od sali lekcyjnej i miesiąca pomiarowego

Fig. 22.6. Statistical distribution of air temperature measured within school hours, depending on the classroom and measurement month

22.3.2. Klasyfikacja jakości środowiska wewnętrznego

Klasyfikacji jakości środowiska wewnętrznego (rys. 22.7) dokonano zgodnie z normą CEN/TR 16798-2 [20] dla klas lekcyjnych o niskim poziomie emisji zanieczyszczeń. Zgodnie z normą, I kategoria jakości środowiska jest zalecana dla obiektów budowlanych przeznaczonych do przebywania dzieci. Zalecenia te zostały

spełnione przez zdecydowany okres (65–84% okresu pomiarowego) w przypadku środowiska cieplnego.



Rys. 22.7. Klasyfikacja według „śladu” środowiska termicznego (TQ) oraz jakości powietrza wewnętrznego (IAQ)

Fig. 22.7. Classification by “footprint” of the thermal environment (TQ) and indoor air quality (IAQ)

Wymagania I kategorii jakości powietrza przez 71% czasu zostały spełnione w S7 – klasa ta była jednak wykorzystywana dość sporadycznie. W pozostałych klasach, gdzie zajęcia odbywały się regularnie, czas ten jest obniżony do 37–46%. Przez znaczny okres (22–33%) zarejestrowane wartości stężenia CO₂ mieszczą się w klasyfikacji dla IV kategorii IAQ lub nawet poza najniższymi wymaganiami. Najniższą IAQ odnotowano w S37, gdzie przez 25% czasu odnotowane parametry są poza klasyfikacją.

22.3.3. Stężenia pyłu zawieszonego

Wartości stężeń frakcji pyłu pobranych w salach edukacyjnych na dwóch stopniach impaktora o średnicach odcięcia 10 μm oraz 2,5 μm zebrano w tabeli 22.2. Pomiarów dokonano dwukrotnie – w okresie wczesno- oraz późnowiosennym. Średnie stężenia pyłu zawieszonego PM_{2.5} w powietrzu wewnątrz klas, zmierzone w marcu utrzymywały się na poziomie od 33 μg/m³ do 51 μg/m³, z kolei frakcji PM₁₀ od 50 μg/m³ do 55 μg/m³, co znacząco przekracza normy jakości powietrza. Aktualne wytyczne WHO dopuszczają 24-godzinny limit ekspozycji na poziomie 15 μg/m³ dla frakcji PM_{2.5} oraz 45 μg/m³ dla frakcji PM₁₀ [21]. Z wyjątkiem pomiaru stężenia PM_{2.5} w S55, wartości zarejestrowane w czerwcu były 20-50% niższe niż w marcu. Jednak w dalszym ciągu wystąpiły znaczące przekroczenia stężenia pyłu PM_{2.5} względem rekomendacji WHO.

Na podstawie zmierzonych poziomów stężeń pyłów zawieszonych wyznaczono wielkości współczynnika I/O. Wartość stosunku I/O utrzymywała się na poziomie od 3,5 do 5,1 w marcu oraz od 2,6 do 5,9 w czerwcu – można więc wywnioskować o dużej roli wewnętrznych źródeł zanieczyszczenia powietrza w kształtowaniu jakości powietrza wewnętrznego.

Tabela 22.2

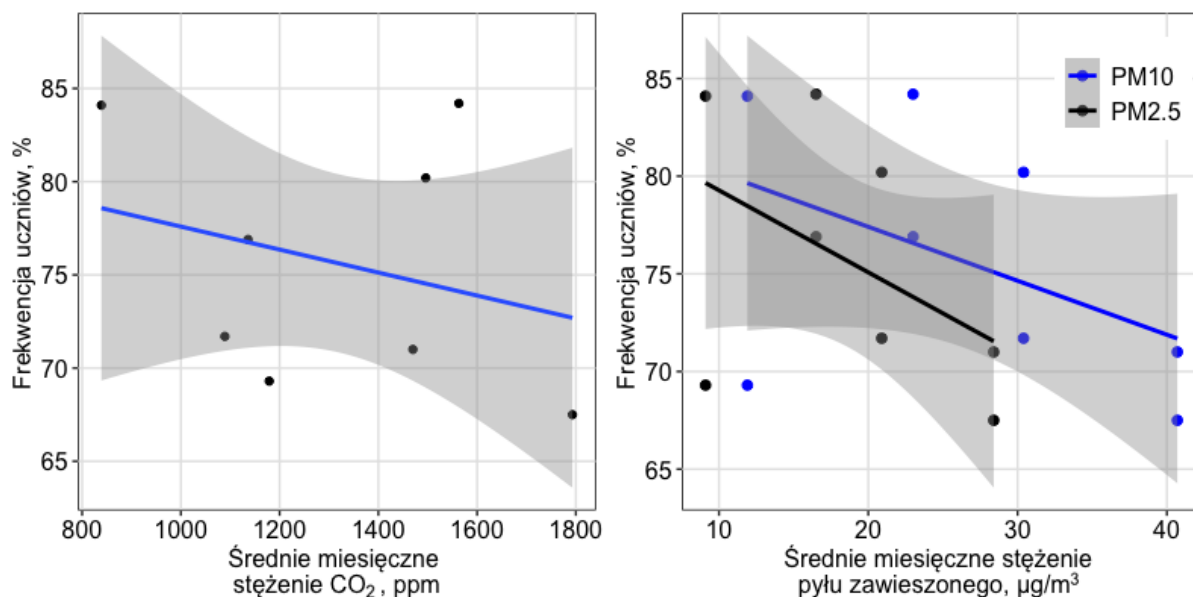
Średnie stężenia pyłu zawieszonego w powietrzu wewnętrznym oraz zewnętrznym (pomiar 23.03/06.06). Wytluszczone odczyty przekraczające wytyczne WHO [21]

Sala	Powietrze wewnętrzne		Powietrze zewnętrzne		Stosunek I/O	
	PM10, $\mu\text{m}/\text{m}^3$	PM2.5, $\mu\text{m}/\text{m}^3$	PM10, $\mu\text{m}/\text{m}^3$	PM2.5, $\mu\text{m}/\text{m}^3$	PM10	PM2.5
S7	55/27	51/25	14/10	10/8	3,9/2,7	5,1/3,1
S21	55/41	37/30	12/10	9/9	4,6/4,1	4,1/3,3
S37	50/28	33/26	12/10	9/8	4,2/2,8	3,7/3,3
S55	51/26	35/47	13/10	10/8	3,9/2,6	3,5/5,9

22.3.4. Frekwencja uczniów

Rysunek 22.8 (po lewej) przedstawia wpływ wzrostu stężenia CO_2 w salach lekcyjnych na frekwencję uczniów. Analiz dokonano dla wartości średniomiesięcznych. Uzyskane wyniki cechują się niską korelacją ($p=0,62$, $r_s=-0,21$). Średni wzrost stężenia CO_2 o 100 ppm skutkowało obniżeniem frekwencji na poziomie 0,6%. Efekt ten jest trzykrotnie większy niż zaobserwowany we wcześniejszych badaniach [16].

Średni poziom korelacji pomiędzy frekwencją uczniów a jakością powietrza zewnętrznego zaobserwowano dla stężenia zapylenia powietrza zewnętrznego ($p=0,28$, $r_s=-0,44$). Wzrost średniego poziomu zapylenia o $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ skutkowało obniżeniem frekwencji dzieci o 4,2%, w przypadku frakcji PM2.5 oraz 2,7%, w przypadku PM10.



Rys. 22.8. Zależność pomiędzy średnią miesięczną frekwencją uczniów a średnim miesięcznym stężeniem CO₂ w salach lekcyjnych (po lewej) oraz średnim miesięcznym stężeniem pyłu zawieszonego w powietrzu zewnętrznym (po prawej). Regresja GLM z 95% przedziałami ufności.

Fig. 22.8. Relationship between the monthly average attendance of students and: monthly average CO₂ concentration in classrooms (left), and monthly average concentration of particulate matter suspended in the outdoor air (right). GLM regression with 95% confidence intervals.

22.4. Podsumowanie i wnioski

Zarejestrowane stężenia CO₂ w trakcie lekcji znacząco przekraczały zalecane wartości w normach jakości powietrza wewnętrznego. Przekroczenia dotyczą również stężenia pyłu zawieszonego w powietrzu wewnątrz sal lekcyjnych. Odnotowane parametry jakości powietrza wewnętrznego mogą negatywnie wpływać na samopoczucie uczniów, m.in. przez zwiększenie senności czy występowanie bólu głowy, co ma przełożenie na obniżenie efektywności uczenia się.

Analizy statystyczne wykazały słabą korelację pomiędzy poziomem stężenia CO₂ a frekwencją uczniów. Średnio na każdy wzrost stężenia CO₂ o 100 ppm skutkowało obniżeniem frekwencji o 0,6%. Zależność średniej mocy odnotowano pomiędzy stężeniem pyłu zawieszonego a frekwencją.

Podziękowania

Praca badawcza sfinansowana przez Politechnikę Śląską w ramach badań statutowych Wydziału Inżynierii Środowiska i Energetyki oraz dofinansowania kształcenia zorientowanego projektowo – PBL (IDUBE, VIII edycja PBL). Protokół badań został zatwierdzony przez Komisję ds. etyki badań naukowych prowadzonych z udziałem ludzi, działającej przy Politechnice Śląskiej (Uchwała z dn. 11 kwietnia 2022, nr 2/2022).

Autorzy składają podziękowania Dyrekcji oraz Nauczycielom Miejskiej Szkoły Podstawowej z Oddziałami Integracyjnymi nr 2 im. Karola Miarki w Knurowie za wyrażenie zgody na prowadzenie badań oraz pomoc przy ich realizacji.

Bibliografia

1. Seppanen O., Fisk W., Mendell M.: Ventilation Rates and Health. *ASHRAE Journal* 2002, 44, 56–58.
2. Seppanen O., Fisk W.: Some Quantitative Relations between Indoor Environmental Quality and Work Performance or Health. *HVAC&R Research* 2006, 12, 957–973, DOI:10.1080/10789669.2006.10391446.
3. Wyon D., Wargocki P.: How Indoor Environment Affects Performance. *ASHRAE Journal* 2013, 55, 46–52.
4. Mendell M.J., Heath G.A.: Do Indoor Pollutants and Thermal Conditions in Schools Influence Student Performance? A Critical Review of the Literature. *Indoor Air* 2005, 15, 27–52, doi:<https://doi.org/10.1111/j.1600-0668.2004.00320.x>.
5. Milton D.K., Glencross P.M., Walters M.D.: Risk of Sick Leave Associated with Outdoor Air Supply Rate, Humidification, and Occupant Complaints. *Indoor Air-International Journal of Indoor Air Quality and Climate* 2000, 10, 212–221, doi:10.1034/j.1600-0668.2000.010004212.x.
6. Fisk W.J., Seppanen O., Faulkner D., Huang J.: Economizer System Cost Effectiveness: Accounting for the Influence of Ventilation Rate on Sick Leave. *Proceedings Healthy Buildings 2003* 2003, 3, 361–367.
7. Kajtár L., Herczeg L.: Influence of Carbon-Dioxide Concentration on Human Well-Being and Intensity of Mental Work. *QJ Hung. Meteorol. Serv* 2012, 116, 145–169.
8. Satish U., Mendell M.J., Shekhar K., Hotchi T., Sullivan D., Streufert S., Fisk W.J.: Is CO₂ an Indoor Pollutant? Direct Effects of Low-to-Moderate CO₂ Concentrations on Human Decision-Making Performance. *Environmental Health Perspectives* 2012, 120, 1671–1677, doi:10.1289/ehp.1104789.
9. Allen J.G., MacNaughton P., Satish U., Santanam S., Vallarino J., Spengler J.D.: Associations of Cognitive Function Scores with Carbon Dioxide, Ventilation, and Volatile Organic Compound Exposures in Office Workers: A Controlled Exposure Study of Green and Conventional Office Environments. *Environ. Health Perspect* 2016, 124, 805–812, doi:10.1289/ehp.1510037.

10. Myhrvold A.N., Olsen E., Lauridsen O.: Indoor Environment in Schools–Pupils Health and Performance in Regard to CO₂ Concentrations. *Indoor Air* 1996, 96, 369–371.
11. Coley D.A., Greeves R., Saxby B.K.: The Effect of Low Ventilation Rates on the Cognitive Function of a Primary School Class. *International Journal of Ventilation* 2007, 6, 107–112, doi:10.1080/14733315.2007.11683770.
12. Bakó-Biró Zs., Clements-Croome D.J., Kochhar N., Awbi H.B., Williams M.J.: Ventilation Rates in Schools and Pupils' Performance. *Building and Environment* 2012, 48, 215–223, doi:10.1016/j.buildenv.2011.08.018.
13. Richards W.: Allergy, Asthma, and School Problems. *Journal of School Health* 1986, 56, 151–152, doi:10.1111/j.1746-1561.1986.tb05725.x.
14. Simons E., Hwang S.-A., Fitzgerald E.F., Kielb C., Lin S.: The Impact of School Building Conditions on Student Absenteeism in Upstate New York. *Am J Public Health* 2010, 100, 1679–1686, doi:10.2105/AJPH.2009.165324.
15. Shendell D.G., Prill R., Fisk W.J., Apte M.G., Blake D., Faulkner D.: Associations between Classroom CO₂ Concentrations and Student Attendance in Washington and Idaho. *Indoor Air* 2004, 14, 333–341, doi:https://doi.org/10.1111/j.1600-0668.2004.00251.x.
16. Gaihre S., Semple S., Miller J., Fielding S., Turner S.: Classroom Carbon Dioxide Concentration, School Attendance, and Educational Attainment. *Journal of School Health* 2014, 84, 569–574, doi:10.1111/josh.12183.
17. ESA Edukacyjna Sieć Antysmogowa Available online: <https://esa.nask.pl> (accessed on 27 March 2023).
18. R Core Team R: A Language and Environment for Statistical Computing; R Foundation for Statistical Computing: Vienna, Austria, 2016.
19. Wickham H.: *Ggplot2: Elegant Graphics for Data Analysis*; Springer-Verlag New York: New York, US, 2009.
20. CEN/TR 16798-2 Energy Performance of Buildings – Ventilation for Buildings – Part 2: Interpretation of the Requirements in EN 16798-1 – Indoor Environmental Input Parameters for Design and Assessment of Energy Performance of Buildings Addressing Indoor Air Quality, Thermal Environment, Lighting and Acoustics (Module M1-6); European Committee for Standardization: Brussels, Belgium, 2019.
21. WHO WHO Global Air Quality Guidelines: Particulate Matter (PM_{2.5} and PM₁₀), Ozone, Nitrogen Dioxide, Sulfur Dioxide and Carbon Monoxide 2021.

OCHRONA KLIMATU I ŚRODOWISKA, NOWOCZESNA ENERGETYKA – WYBRANE ZAGADNIENIA

Streszczenie

Monografia prezentuje wybrane problemy badawcze, rozpatrywane w ramach szóstego Priorytetowego Obszaru Badawczego (POB6) *Ochrona klimatu i środowiska, nowoczesna energetyka*.

W rozdziale 1. opisano badania składu izotopów stabilnych węgla w igłach sosny (*Pinus Sylvestris L.*) rosnącej na obszarze Śląska. Drzewa jako archiwa izotopowe zmian środowiska, w którym rosną, mogą być wykorzystane w szczególności do określania składowej antropogenicznej CO₂. Zastosowanie metody bilansu masy w połączeniu z analizą przestrzenną pozwalało na wskazanie źródeł emisji oraz ich udziału w składowej antropogenicznej. Analiza czasowa składu izotopowego pokazała zróżnicowanie udziału węgla pochodzącego z różnych źródeł; wyraźnie odzwierciedlony jest sygnał związany z ograniczeniami mobilności podczas pandemii COVID w 2019 r. oraz zmiany zachodzące w sektorze energetycznym na Śląsku.

W rozdziale 2. przedstawione zostały wartości stężeń pyłów PM₁₀ i PM_{2,5} oraz SO₂, NO, NO_x i O₃ odnotowane w 2020 r. przez mobilne laboratorium, zlokalizowane na terenie kampusu Politechniki Śląskiej. Wyniki pomiarów, w rozbiciu na okres letni (od 01.04.2020 do 30.09.2020) oraz okres zimowy (od 1.01.2020 do 31.03.2020 oraz od 01.10.2020 do 31.12.2020), zostały usystematyzowane (liniowo uporządkowane i pogrupowane) przy zastosowaniu metody Czekanowskiego. W warstwie obliczeniowej wykorzystany został program MaCzek v. 3.0.

W rozdziale 3. użyte zostały wyniki pomiarów stężeń różnych frakcji pyłu zawieszonego oraz wybranych pierwiastków śladowych (w tym kancerogennych dla ludzi), jakie zostały zmierzone w sąsiedztwie wybranych czterech elektrowni i czterech koksowni na obszarze województwa śląskiego. Wartości te zinterpretowane zostały w dwojaki sposób: jako wyniki końcowe (w ramach oceny jednokryterialnej zagrożenia środowiska antropogenicznego) i jako wyniki cząstkowe (w ramach oceny wielokryterialnej zagrożenia środowiska antropogenicznego). W przypadku oceny

wielokryterialnej (jej wynikiem była zagregowana, syntetyczna ocena stanu zagrożenia) wykorzystana została metoda miernika rozwoju.

W rozdziale 4. przedstawiono wpływ Drogowej Trasy Średnicowej (DTŚ) na stan powietrza w rejonie miasta Gliwice. Celem badania była ocena zależności pomiędzy natężeniem ruchu a stężeniem dwutlenku azotu na analizowanym odcinku drogi. Stężenie dwutlenku azotu mierzono metodą optycznej spektroskopii absorpcyjnej różnicowej, przy użyciu analizatora OPSIS, zlokalizowanego nad DTŚ w centralnej części Gliwic. Natężenie ruchu przyjęto na podstawie danych pochodzących z automatycznego systemu monitoringu Zarządu Dróg Miejskich w Gliwicach. Wyniki analiz potwierdziły tezę, że budowa DTŚ-i o znacznym natężeniu ruchu w Gliwicach nie wpłynęła negatywnie na stan powietrza w mieście, a wręcz usprawnienie i upłynnienie ruchu lokalnego na obszarze miast Gliwice i Katowice przez DTŚ-ę przyczynia się do poprawy jakości powietrza.

W rozdziale 5. przedstawiono badania, w których wykorzystano niskokosztowe czujniki Flow 2 do monitorowania narażenia na NO₂ podczas dojazdów do pracy rowerem w centrum i okolicy miasta Gliwice. Uzyskane wyniki świadczą o przekroczeniach stężenia średniodobowego, rekomendowanego przez WHO (25 µg/m³) zarówno w centrum miasta, jak i poza nim. Wśród nich można wyróżnić wartości szczytowe 103–113 µg/m³, które odnotowano w miesiącach marcu, czerwcu i październiku.

W rozdziale 6. pokazano profilaktykę związaną z redukcją zanieczyszczenia powietrza pyłami kopalnianymi. Ze względu na skutki zdrowotne, najważniejsze są cząstki frakcji respirabilnej, która stwarza zagrożenie dla zdrowia po zdeponowaniu w obszarze wymiany gazowej. Ten pył jest odpowiedzialny za rozwój pylicy płuc, większości nowotworów oraz zapalenia pęcherzyków płucnych. W celu zobrazowania wielkości narażenia omówiono procedurę oceny ryzyka zdrowotnego oraz przedstawiono przykładową ocenę na stanowisku kombajnisty ścianowego. Następnie wskazano pożądane działania profilaktyczne. W podsumowaniu odniesiono się do wniosków płynących z wykonanej procedury oceny i analizy ryzyka zdrowotnego.

W rozdziale 7. zaprezentowano krótką informację o tunelach i zagrożeniach występujących przy ich drażeniu. Do oszacowania ryzyka zawodowego wybrano metodę SCORE RISC, której najważniejsze elementy zawarto w osobnym podrozdziale. Dla zobrazowania zagrożeń pokazano przykładową ocenę ryzyka zawodowego na stanowisku operatora wiertnicy. Następnie wskazano pożądane działania profilaktyczne. W podsumowaniu odniesiono się do wniosków płynących

z wykonanej procedury oceny i analizy ryzyka zawodowego podczas drażenia tuneli metodami górniczymi.

W rozdziale 8. przedstawiono przykład eksploatacji złóż węgla kamiennego zrealizowanej w GZW, w 2019 r. na stosunkowo niewielkich (średnich) głębokościach i jej wpływ na pobliski budynek mieszkalny. Odpowiednimi pomiarami geodezyjnymi określono wychylenia jego ścian na zewnątrz i wewnątrz oraz nachylenie posadzki w środku budynku. Zbieżne położenie parceli ze wcześniej eksploatowanymi ścianami przyczyniło się do powstania na powierzchni terenu w rejonie obiektu budowlanego nieciągłych deformacji typu liniowego (jeden stopień terenowy pod domem i trzy stopnie w jego pobliżu). Budynek doznał znacznych uszkodzeń zarówno wewnątrz, jak i na zewnątrz. Wystąpiły pęknięcia stropów i ścian działowych oraz elewacji zewnętrznej.

W rozdziale 9. umieszczono krótkie podsumowanie, dotyczące wpływu temperatury i pH na stabilność progesteronu, estrogenów i ich pochodnych w roztworach wzorcowych oraz próbkach środowiskowych bazując na doniesieniach literaturowych i uzyskanych wynikach badań eksperymentalnych. Obserwacje i wnioski opisane w niniejszej pracy są istotne z perspektywy praktyki laboratoryjnej podczas oznaczeń mikrozanieczyszczeń próbek środowiskowych związkami endokrynnie czynnymi. W rozdziale omówiono również użyteczność widm magnetycznego rezonansu jądrowego (^1H NMR) w analizie zmian strukturalnych, w cząsteczkach oznaczanych hormonów płciowych, w wyniku działania wybranych czynników fizykochemicznych lub biochemicznych.

W rozdziale 10. przedstawiono przegląd artykułów naukowych dotyczących występowania w środowisku wodnym środków przeciwdrobnoustrojowych zaliczonych przez Światową Organizację Zdrowia do kategorii Reserve (zgodnie z systemem klasyfikacji AWaRe, zaktualizowanym w 2021 r.). Wymieniono główne przyczyny i źródła zanieczyszczenia antybiotykami rezerwowymi oraz wynikające z tego skutki. Omówiono również aktualny stan prawny w Polsce i Europie regulujący kwestie przeciwdziałania antybiooporności oraz monitoringu powyższych farmaceutyków w środowisku naturalnym.

W rozdziale 11. pokazano problematykę gospodarowania materiałami i energią w budownictwie, zwracając uwagę na możliwość wytworzenia mieszanek betonowych z kruszywem lekkim z odpadowych elementów wyrobów budowlanych po skruszeniu. Kruszywo główne stanowiły granule autoklawizowanego betonu komórkowego, a dodatkami był: perlit, naturalny korek, guma SBR i keramzyt. Zdefiniowano kruszywa lekkie, przenikalność cieplną, przeanalizowano wyniki badań wykonanych

mieszanek z betonu, w szczególności skupiając się na współczynniku przewodzenia ciepła, λ wynoszącym od 0,217 do 0,341 W/(m·K).

Celem badań przedstawionych w rozdziale 12. była: izolacja szczepów bakterii środowiskowych, zdolnych do produkcji węglanu wapnia, ich scharakteryzowanie oraz sprawdzenie możliwości ich wykorzystania jako składnika samonaprawialnego geopolimeru jako bardziej ekologicznego i ekonomicznego materiału budowlanego. Mikroorganizmy są doskonałym narzędziem usuwania odpadów i produkcji ważnych związków chemicznych, dlatego też stanowią kluczowy element rozwoju nowych biotechnologii. Środowisko jest wartościowym źródłem bakterii użytecznych w biotechnologii. Jednym z procesów mikrobiologicznych, który można efektywnie wykorzystać w rozwoju technologii przyjaznych środowisku, w tym w produkcji ekologicznych materiałów budowlanych, jakimi są geopolimery, jest mikrobiologiczna precypitacja węglanu wapnia (ang. microbially induced calcium carbonate precipitation, MICP).

W rozdziale 13. zaprezentowano wybrane metody badań materiałów stosowanych w fotowoltaice i ogniw słonecznych. Wraz z rozwojem technologii oraz gospodarki rośnie zapotrzebowanie na energię. Sprostanie tym wyzwaniom wymaga radykalnych zmian w światowym systemie energetycznym. Inwestycją w przyszłość jest wybór odnawialnych źródeł energii. Energia promieniowania słonecznego jest jedną z najefektywniejszych ekologicznych rozwiązań, a urządzeniem umożliwiającym jej bezpośrednią zamianę na energię elektryczną jest ogniwo słoneczne. Technologia wytwarzania ogniw fotowoltaicznych jest skomplikowana i składa się z wielu etapów, z których każdy wymaga kontroli jakości.

W rozdziale 14. przedstawiono sposób redukcji kosztów energetycznych przewietrzania w podziemnym obiekcie turystycznym. Prowadzenie działalności muzealnej i turystycznej w podziemnych obiektach pociąga za sobą ponoszenie wielu kosztów, związanych między innymi z utrzymaniem odpowiedniej wentylacji dla zapewnienia właściwych parametrów powietrza (składu chemicznego, temperatury, wilgotności), zarówno dla zwiedzających, jak i dla zabytkowej obudowy wyrobisk, maszyn, urządzeń oraz eksponatów. Przeprowadzając optymalizację sieci wentylacyjnej między innymi przez minimalizację ilości powietrza, zmianę parametrów pracy wentylatorów, sposób przewietrzania, ogrzewanie lub chłodzenie powietrza, zastosowanie rekuperacji, można w znaczący sposób ograniczyć koszty przewietrzania.

W rozdziale 15. przedstawiono sposób na podniesienie efektywności energetycznej klimatyzacji w górnictwie podziemnym z wykorzystaniem free-cooling.

W warunkach kopalń podziemnych (zarówno tych polskich, europejskich, jak i światowych) znaczącą ilość energii elektrycznej pochłaniają wentylacja i klimatyzacja. W tych warunkach opcja free-cooling w systemach klimatyzacyjnych staje się sposobem na zmniejszanie zużycia energii podczas tworzenia warunków komfortu cieplnego w kopalni. Systemy takie sprawdzają się doskonale w sezonach zimowych oraz dobrze w przejściowych. W warunkach klimatycznych Polski ich efektywne działanie może teoretycznie objąć nawet 5–6 miesięcy w roku.

Rozdział 16. prezentuje wyniki ankiety, która miała na celu poznanie sposobu postrzegania transformacji energetycznej przez studentów oraz weryfikację tezy o większej świadomości zagadnień związanych z transformacją i ukierunkowaniu na rozwój odnawialnych źródeł energii wśród tej grupy społecznej. Zmiany klimatyczne i zła jakość powietrza spowodowały, że problem ochrony klimatu stał się bardzo istotny dla społeczeństwa. Przeciwdziałanie temu wymaga transformacji energetycznej, prowadzącej do osiągnięcia neutralności klimatycznej. Celem takiej transformacji jest odejście od paliw kopalnych, co wiąże się z przebudową wszystkich sektorów energetycznych, mianowicie energii elektrycznej, ciepła, gazu i paliw transportowych. Bardzo ważna jest również efektywność energetyczna, która ogranicza zapotrzebowanie na energię pierwotną.

W rozdziale 17. przedstawiono projekt edukacyjny zrealizowany w latach 2019–2023 przez Stowarzyszenie Polski Ruch Czystszej Produkcji. Projekt pod nazwą „Kampania edukacyjna na temat zapobiegania zanieczyszczeniom oraz GOZ, z wykorzystaniem doświadczeń CP i EMAS” został dofinansowany przez Narodowy Fundusz Ochrony Środowiska i Gospodarki Wodnej (NFOŚiGW), w ramach programu priorytetowego Edukacja Ekologiczna i w ramach działań o szczególnym znaczeniu dla ministra właściwego do spraw środowiska. Omówiono efekty projektu i wstępne rekomendacje dla organizacji, wynikające z doświadczeń dobrych praktyk.

W rozdziale 18. skupiono się na obecności mikrodrobin plastiku (MPs) w środowiskach wewnętrznych. Źródła MPs w pomieszczeniach obejmują uwalnianie pierwotne z produktów takich jak materiały budowlane, tekstylia czy kosmetyki, a także wtórne emisje w procesach wietrzenia. Do identyfikacji MPs mogą być wykorzystywane różne techniki analityczne, w tym analiza morfologiczna i techniki instrumentalne. Narażenie ludzi na cząsteczki MPs odbywa się drogami inhalacyjną i pokarmową, a potencjalne zagrożenie dla zdrowia wiąże się ze stresem oksydacyjnym, stanem zapalnym i genotoksycznością. W związku z tym, zanieczyszczenie środowisk wewnętrznych mikrodrobinami plastiku ma kluczowe znaczenie w kontekście ochrony zdrowia i środowiska.

W rozdziale 19. przedstawiono zasady poprawnej rewitalizacji terenów przemysłowych, a także rolę inżyniera budownictwa w tym procesie. Omówiono możliwe kierunki ponownego wykorzystania, ryzyka dla uczestników tego procesu. Niektóre z opisywanych rozwiązań zilustrowano praktycznymi przykładami rewitalizacji obiektów znajdujących się głównie na terenie Górnego Śląska.

W rozdziale 20. pokazano analizę zagrożeń związanych z transportem wodoru i amoniaku oraz ich mieszanin z innymi paliwami. W wyniku awarii rurociągów przesyłowych tych substancji może nastąpić ich niekontrolowany wypływ, prowadzący do niebezpiecznych dla ludzi i otoczenia skutków w postaci np. pożaru lub transportu chmury o wysokiej koncentracji. W rozdziale przedstawiono zasięgi przykładowych stref zagrożenia, powstałych na skutek tego typu awarii.

W rozdziale 21. przedstawiono wyniki badań wybranych elektronicznych czujników stężenia pyłu w powietrzu. Wybrane czujniki to urządzenia przeznaczone do ciągłego monitorowania środowiska, instalowane w wielu urządzeniach komercyjnych (stan powietrza, filtracja, informacja). Ponadto istnieje potrzeba automatycznego monitorowania pyłu, szczególnie w pomieszczeniach, gdzie obecnie człowiek przebywa najczęściej. Porównano działanie wybranych, laserowych czujników łatwo dostępnych na rynku elektronicznym w różnych warunkach pracy. Porównanie miało na celu pokazanie, który z wybranych czujników cechuje się najmniejszym błędem pomiaru. Wykonano wiele badań porównawczych w środowisku z użyciem urządzenia referencyjnego. Wyniki porównania przedstawiono na wykresach słupkowych, z uwzględnieniem błędu pomiaru.

Celem badań przedstawionych w rozdziale 22. była długoterminowa analiza jakości powietrza wewnętrznego w wybranej szkole podstawowej na Śląsku oraz ocena jej wpływu na frekwencję uczniów. Zarejestrowane stężenia CO₂ w trakcie lekcji znacząco przekraczały zalecane wartości w normach jakości powietrza wewnętrznego. Przekroczenia dotyczyły również stężenia pyłu zawieszonego w powietrzu wewnątrz sal lekcyjnych. Odnotowane parametry jakości powietrza wewnętrznego mogą negatywnie wpływać na samopoczucie uczniów, m.in. przez zwiększenie senności czy występowanie bólu głowy, co ma przełożenie na obniżenie efektywności uczenia się. Analizy statystyczne wykazały słabą korelację pomiędzy poziomem stężenia CO₂ a frekwencją uczniów – średnio na każdy wzrost stężenia CO₂ o 100 ppm skutkowało obniżeniem frekwencji o 0,6%.

CLIMATE AND ENVIRONMENT PROTECTION, MODERN ENERGY – SELECTED ISSUES

Abstract

The monograph presents selected research problems considered within the sixth Research Priority Area (POB6) *Climate and environmental protection, modern energy*.

In chapter 1 the stable carbon isotope composition was investigated in needles of *Pinus Sylvestris* L. growing in Silesia. Trees, which are the isotopic archives of the changes in the environment, can be used in determination of anthropogenic fraction of CO₂ emission. Using the mass balance method, it was possible to determine the partitioning of the CO₂ origin from different sources. The variation in the carbon origin fraction from traffic and coal combustion can vary due to the reduction and limitation of mobility due to the COVID restriction in 2019, but also due to changes in the energetic sector in Silesia.

Chapter 2 presents the concentration values of particulate matter PM₁₀ and PM_{2.5} as well as SO₂, NO, NO_x and O₃ recorded in 2020 by a mobile laboratory located on the premises of the Silesian University of Technology. Measurement results broken down into the summer period (from 01.04.2020 to 30.09.2020) and the winter period (from 01.01.2020 to 31.03.2020 and from 01.10.2020 2020 to 31 December 2020) were systematized (linearly ordered and grouped) using the Czekanowski method. MaCzek v.3.0 was used in the computational layer.

Chapter 3 uses the results of measurements of concentrations of various particulate matter fractions and selected trace elements (including those carcinogenic to humans) that were measured in the vicinity of four selected power plants and four coking plants in the Silesian Voivodeship. These values were interpreted in two ways: as final results (as part of the single-criteria assessment of the threat to the anthropogenic environment) and as partial results (as part of the multi-criteria assessment of the threat to the anthropogenic environment). In the case of the multi-criteria assessment (its result was an aggregated, synthetic assessment of the state of threat), the development measure method was used.

Chapter 4 presents the influence of the Drogowa Trasa Średnicowa (DTŚ) on the condition of air in the area of the city of Gliwice. The main aim of the study was to assess the relationship between traffic intensity and nitrogen dioxide concentration on the analysed road section. The concentration of nitrogen dioxide was measured by differential optical absorption spectroscopy, using the OPSIS analyser located over DTŚ in the central part of Gliwice. Traffic intensity was based on data from the automatic monitoring system of the Municipal Roads Management in Gliwice. The results of the analyses confirmed the thesis that the building of DTŚ with significant traffic intensity in Gliwice did not have a negative impact on the state of air in the city, and in fact the improvement and fluidity of local traffic in the area of the cities of Gliwice and Katowice through DTŚ contributes to the improvement of air quality.

Chapter 5 presents the study used low-cost Flow 2 sensors to monitor NO₂ exposure during bicycle commuting in and around the city centre of Gliwice. The results show that the WHO-recommended 24-hour average concentration (25 µg/m³) is exceeded both in and outside the city centre. Among them, peak values from 103–113 µg/m³ can be distinguished, which were recorded in the months of March, June and October.

Chapter 6 presents prevention related to the reduction of air pollution from mine dust. In terms of health effects, the most important are the particles of the respirable fraction, which pose a health risk when deposited in the gas exchange area. This dust is responsible for the development of pneumoconiosis, most cancers and alveolitis. In order to illustrate the magnitude of the exposure, the health risk assessment procedure is discussed and an example of an assessment at the position of a longwall shearer is presented. Desired preventive measures are then indicated. In conclusion, reference is made to the conclusions of the health risk assessment and analysis procedure performed.

Chapter 7 provides a brief overview of tunnels and the risks involved in tunnelling them. The SCORE RISC method was chosen for the estimation of occupational risks, the most important elements of which are included in a separate subchapter. To illustrate the hazards, an example of an occupational risk assessment for the position of drill rig operator is shown. Desired preventive measures are then indicated. In conclusion, reference is made to the conclusions of the performed procedure of assessment and analysis of occupational risk during tunnelling by mining methods.

In chapter 8 an example of the exploitation of hard coal deposits carried out in the Upper Silesian Coal Basin, in 2019 at relatively small (average) depths and its impact on a nearby residential building has been presented. Appropriate geodetic

measurements determined the inclination of its walls outside and inside, as well as the inclination of the floor inside the building. The convergent location of the mining excavation with the previously exploited longwalls contributed to the creation on a land surface, in the area of the building discontinuous linear deformations (one ground step under the house and three steps near it). The building gets significant damage both inside and out. There were cracks in the ceilings and the partition walls as well as the external façade.

Chapter 9 presents a brief summary of the influence of temperature and pH on the stability of progesterone, estrogens and their derivatives in standard solutions and environmental samples, based on literature reports and our experimental results. The observations and conclusions described in this paper are important from the perspective of laboratory practice during the determination of endocrine disrupting micropollutants in environmental samples. In this chapter, we also discussed the usefulness of the nuclear magnetic resonance (^1H NMR) spectra in analysis of the changes in the sex hormone molecule structures resulting from the selected physicochemical or biochemical factors.

Chapter 10 presents a review of scientific articles on the occurrence of antimicrobials classified by the World Health Organization as Reserve (in accordance with the AWaRe Classification updated in 2021) in the aquatic environment. The main causes and sources of contamination with reserve antibiotics and the resulting effects are listed. The current legal situation in Poland and Europe regulating the issues of counteracting antibiotic resistance and monitoring of the above pharmaceuticals in the natural environment was also discussed.

Chapter 11 presents the issues of materials and energy management in the construction industry, paying attention to the possibility of producing concrete mixes with lightweight aggregate from waste elements of construction products after crushing. The main aggregate was autoclaved aerated concrete granules, and the additions were perlite, natural cork, SBR rubber and expanded clay. Lightweight aggregates and thermal permeability were defined, the results of tests of concrete mixes were analyzed, focusing in particular on the thermal conductivity – lambda coefficient ranging from 0.217 to 0.341 W/(m·K).

The aim of work presented in chapter 12 was to isolate environmental bacteria strains capable of producing calcium carbonate, characterize them and assess the possibility of their use as a component of a self-healing geopolymer as a more ecological and economical building material. Microorganisms are an excellent tool for waste disposal and the production of important chemicals. That is why they are a key

element of new biotechnologies development. The environment is an valuable source of biotechnologically relevant bacteria. One of the microbiological processes that can be effectively used in the development of environmentally friendly technologies, including the production of ecological building materials, such as geopolymers, is microbially induced calcium carbonate precipitation (MICP).

Chapter 13 presents selected research methods for materials used in photovoltaics and solar cells. With the growth of production and the economy, the demand for energy increases. Meeting these challenges requires radical changes in the global energy system. An investment in the future is using the potential of renewable energy sources. Solar radiation energy is one of the most effective ecological solutions, and the device enabling its direct conversion into electricity is a solar cell. The production technology of solar cells is complex and consists of many stages, each of which requires quality control.

Chapter 14 presents a way to reduce the energy costs of ventilation in an underground tourist facility. Conducting museum and tourist activities in underground facilities involves many costs, including maintaining adequate ventilation to ensure proper air parameters (chemical composition, temperature, humidity), both for visitors and for the historic excavation shell, machinery, equipment and exhibits. By optimising the ventilation network through, among other things, minimising the amount of air, changing the parameters of the fans, the method of ventilation, heating or cooling the air, using recuperation, it is possible to significantly reduce ventilation costs.

Chapter 15 presents a way to increase the energy efficiency of air conditioning in underground mining using free-cooling. In the conditions of underground mines (both Polish, European and global), ventilation and air conditioning are significant consumers of electricity. Under these conditions, the free-cooling option in air-conditioning systems becomes a way of reducing energy consumption while creating thermal comfort conditions in the mine. Such systems perform well in winter seasons and well in transitional seasons. Under Polish climatic conditions, their effective operation can theoretically cover as much as 5–6 months of the year.

Chapter 16 presents the results of survey, which intention was to find out how students perceive the energy transition and verify the thesis about greater awareness of issues related to the transition and focus on the development of renewable energy sources among this social group. Climate change and poor air quality have caused climate protection to be a very significant matter for society. Counteracting this requires energy transition leading to climate neutrality. The goal of such a transition is

to move away from fossil fuels, which involves reconstruction of all energy sectors: electricity, heat, gas, and transport fuels. Energy efficiency, which reduces the demand for primary energy, is also crucial.

Chapter 17 presents an educational project implemented in 2019–2023 by the Polish Cleaner Production Movement Association. The project entitled: “Educational campaign on pollution prevention and circular economy, using the experience of CP and EMAS” was co-financed by the National Fund for Environmental Protection and Water Management (NFOŚiGW), under the priority program Ecological Education and as part of activities of particular importance to the minister responsible for the environment. The effects of the project and initial recommendations for organizations resulting from the experience of good practices were discussed.

Chapter 18 focuses on the presence of microplastics (MPs) in indoor environments. Indoor sources of MPs include primary releases from products like building materials, fabrics and cosmetics, as well as secondary releases through weathering processes. Various analytical techniques, including morphological analysis and instrumental techniques are used to identify MPs. Human exposure to MPs occurs through inhalation and ingestion, with potential health risks including oxidative stress, inflammation, and genotoxicity. Overall, addressing the issue of MPs in indoor environments is essential for mitigating environmental pollution and safeguarding human health.

Chapter 19 presents the principles of proper revitalization of postindustrial areas (brownfields), as well as the role of a civil engineer in this process. Possible directions of reuse and risks for the participants of this process were discussed. Some of the described solutions are illustrated with practical examples of revitalization of structures located mainly in Upper Silesia.

In the chapter 20 an analysis of the hazards related to the transport of hydrogen and ammonia and their mixtures with other fuels is presented. As a result of the failure of transmission pipelines for these substances, their uncontrolled release may occur, leading to hazardous consequences for humans and the environment such as fire or the transport of a high concentration cloud. The chapter presents the ranges of exemplary hazardous zones created by this type of accident.

Chapter 21 presents the test results of selected electronic dust concentration sensors in the air. The selected sensors are devices for continuous environmental monitoring installed in many commercial devices (air condition, filtration, information). In addition, there is a need for automatic dust monitoring, especially in rooms where people spend most of their time. The operation of selected laser sensors readily

available on the electronic market in various operating conditions was compared. The purpose of the comparison was to show which of the selected sensors has the smallest measurement error. A number of comparative tests were carried out in the environment using a reference device. The results of the comparison are presented on bar graphs taking into account the measurement error.

The research presented in chapter 22 aimed to conduct a long-term analysis of indoor air quality in a selected primary school in Silesia and assess its impact on student attendance. The CO₂ concentrations recorded during the lessons substantially exceeded the recommended values in the indoor air quality standards. Exceedances also concerned the concentration of particulate matter in the classrooms' indoor air. The recorded indoor air quality parameters may adversely affect the well-being of students, e.g., by increasing drowsiness or occurrence of headaches, which translates into a decrease in learning efficiency. Statistical analyzes showed a weak correlation between the level of CO₂ concentration and student attendance: on average, for every increase in CO₂ concentration by 100 ppm, attendance decreased by 0.6%.

WYDAWNICTWO POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ
ul. Akademicka 5, 44-100 Gliwice
tel. (32) 237-13-81,
wydawnictwo@polsl.pl

www.wydawnictwopolitechniki.pl

UIW 48600

Sprzedaż i Marketing
tel. (32) 237-18-48
wydawnictwo_mark@polsl.pl

Nakł. 100 + 44

Ark. wyd. 25,5

Ark. druk. 21,125

Papier 80 g

Zam. 102/23
Monografia 1006



ISBN 978-83-7880-929-6
Wydawnictwo Politechniki Śląskiej

Seria: Inicjatywa Doskonałości - Uczelnia Badawcza



Politechnika
Śląska



**UCZELNIA
BADAWCZA**
INICJATYWA DOSKONAŁOŚCI