



NAUKA – **TECHNIKA** – TECHNOLOGIA

S E R I A W Y D A W N I C Z A A G H

T O M 10



WYDAWNICTWA AGH

KRAKÓW 2024

NAUKA – TECHNIKA – TECHNOLOGIA

S E R I A W Y D A W N I C Z A A G H

T O M 10



WYDAWNICTWA AGH

KRAKÓW 2024

Wydawnictwa Akademii Górniczo-Hutniczej im. Stanisława Staszica w Krakowie

© Wydawnictwa AGH, Kraków 2024

ISBN 978-83-68219-20-3

ISSN 3071-7027

Monografia elektroniczna dostępna online.

DOI: <https://doi.org/10.7494/978-83-68219-20-3>

Publikacja może być rozpowszechniana zgodnie z licencją Creative Commons CC BY 4.0

Komitet Redakcyjny serii „Nauka – Technika – Technologia”:

redaktor: *prof. dr hab. inż. Andrzej Gonet* (AGH Akademia Górniczo-Hutnicza, Wydział Wiertnictwa, Nafty i Gazu, Kraków)

sekretarz: *dr inż. Robert Rado* (AGH Akademia Górniczo-Hutnicza, Wydział Wiertnictwa, Nafty i Gazu, Kraków)

Zamieszczone w tomie publikacje zostały pozytywnie zaopiniowane przez recenzentów wyznaczonych przez Komitet Redakcyjny serii.

Opracowanie redakcyjne i korekta: *Kamila Zimnicka*

Projekt okładki i strony tytułowej serii: *Paweł Sepielak*

Skład komputerowy: *Andre*

Wydawnictwa AGH

al. A. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków

tel. 12 617 32 28, 12 636 40 38

e-mail: redakcja@wydawnictwoagh.pl

www.wydawnictwo.agh.edu.pl

Spis treści

Aleksandra Jamrozik, Andrzej Szczygieł

Mikro- i nanomateriały w technologii płuczek wiertniczych na bazie olejowej, stosowanych do wiercenia otworów w warunkach wysokiego ciśnienia i wysokiej temperatury (HPHT)	5
---	---

Stanisława Kluska, Jadwiga Skoczek

Kształtowanie właściwości powierzchniowych materiałów polimerowych stosowanych w implantologii	17
---	----

Karolina Kopacz

Projekt innowacyjnego mechanizmu posuwisto-zwrotnego napędzającego żerdź przenośnika zabierakowego	31
---	----

Piotr Książek

Stanowisko badawcze do demonstracji działania dźwiękochłonnych metamateriałów akustycznych w falowodach o przekroju okrągłym	41
--	----

Agata Maksymowicz

Emerytowani pracownicy naukowci – okoliczności towarzyszące przejściu w stan spoczynku	55
---	----

Robert Rado

Możliwości zastosowania iniekcji wykonywanych otworami wiertniczymi głębokimi w celu ograniczenia dopływu wód do podziemnych wyrobisk górniczych	67
--	----

Filip Węgrzyn

Budowa analogowego efektu audio sterowanego biosygnalami	85
--	----

Jan Ziaja, Krzysztof Szerszeń

Porównanie metod uzdatniania mechanicznego popiołu lotnego wapiennego	103
--	-----

Mikro- i nanomateriały w technologii płuczek wiertniczych na bazie olejowej, stosowanych do wiercenia otworów w warunkach wysokiego ciśnienia i wysokiej temperatury (HPHT)

Aleksandra Jamrozik¹ , Andrzej Szczygieł²

¹ AGH Akademia Górniczo-Hutnicza, Wydział Wiertnictwa, Nafty i Gazu, Kraków

² Chemfor Poland Sp. z o.o.

Streszczenie: Płuczki na bazie olejowej stosowane są głównie podczas wiercenia otworów w trudnych warunkach geologiczno-złożowych, takich jak np.: wysoka temperatura, wysokie ciśnienia złożowe, występowanie reaktywnych formacji skalnych czy też dopływ zmineralizowanych wód złożowych. W publikacji przedstawiono wyniki laboratoryjnych badań parametrów reologicznych oraz stabilności płuczki wiertniczej na bazie olejowej, gdzie jako materiał obciążający zastosowano mikronizowany baryt. W celu poprawy stabilności tych płuczek stosowano organofilny nanomateriał, jakim był amino-atapulgit.

W wyniku przeprowadzonych badań wykazano, że zastosowanie mikronizowanego barytu w połączeniu z amino-atapulgitem w płuczkach na bazie olejowej pozwala na modyfikację ich właściwości technologicznych w szerokich zakresach ciężaru właściwego i niskich wartościach właściwości reologicznych. Na podstawie uzyskanych wyników badań stwierdzono, że włączenie organofilnych atapulgitów do płuczek wiertniczych na bazie olejowej oraz zastosowanie mikronizowanego barytu jako materiału obciążającego ogranicza sedimentację barytu, a także poprawia stabilność takich płuczek.

Słowa kluczowe: płuczki wiertnicze na bazie olejowej, wiercenie otworów, sedimentacja barytu

MICRO- AND NANOMATERIALS IN OIL-BASED DRILLING FLUIDS TECHNOLOGY USED FOR HIGH-PRESSURE, HIGH-TEMPERATURE (HPHT) DRILLING

Abstract: Oil-based drilling fluids are primarily used in challenging geological and reservoir conditions, such as high temperatures, high pressures, reactive rock formations, or the influx of mineralized formation water.

This publication presents the results of laboratory tests on the rheological properties and stability of oil-based drilling fluid, with micronized barite as the weighting material. To enhance the stability of these drilling fluids, an organophilic nanomaterial – amino-attapulgit, was used.

The research demonstrated that the combination of micronized barite and amino-attapulgit in oil-based fluids allows for the modification of their properties across a wide range of densities and low rheological values. The results showed that incorporating organophilic attapulgit and using micronized barite as the weighting agent reduces sedimentation conditions and improving stability drilling fluids.

Keywords: oil-based drilling fluids, well drilling, barite sagging

https://doi.org/10.7494/978-83-68219-20-3_1

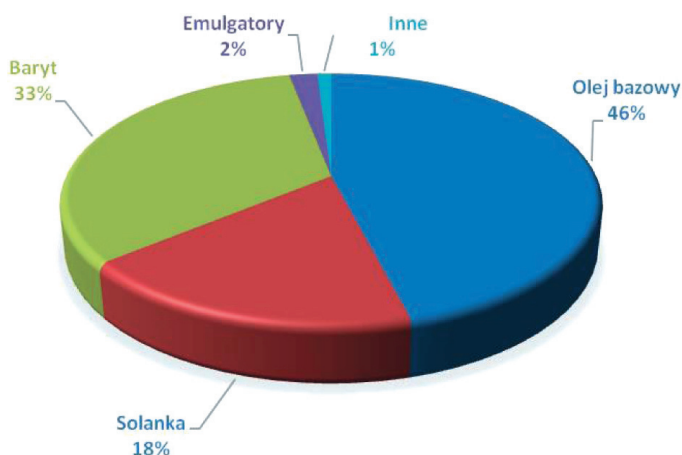
1. Wstęp

Nieustanny rozwój gospodarczy skutkuje wzrostem globalnego zapotrzebowania na energię. Pomimo postępu w rozwoju odnawialnych źródeł energii (OZE) transformacja energetyczna przebiegała wolniej, niż oczekiwano, a kluczowe dzwignie tej transformacji nie są jeszcze wystarczająco zaawansowane technologicznie ani opłacalne. Czynniki te w połączeniu z rosnącym zapotrzebowaniem na energię oznaczają, że same odnawialne źródła energii nie są obecnie prognozowane jako wystarczające do zaspokojenia przyszłych potrzeb energetycznych świata. Według McKinsey & Company (2024) paliwa kopalne, w tym ropa naftowa, gaz ziemny i węgiel, będą nadal pełnić istotną rolę (choć nieco mniejszą niż do tej pory) w globalnym miksie energetycznym do 2050 r., zaspokajając, w zależności od przyjętego scenariusza, od 40 procent do 60 procent światowego zapotrzebowania na energię.

Obecnie surowce mineralne w postaci ropy naftowej, gazu ziemnego czy też wód geotermalnych eksplorowane są z coraz to większych głębokości, co skutkuje prowadzeniem prac wiertniczych w warunkach wysokich ciśnień i wysokiej temperatury (HPHT). Prowadzenie prac wiertniczych w warunkach HPHT stawia przed firmami i operatorami wiertniczymi wiele wyzwań związanych z doborem technologii wiercenia i sprzętu czy też związanych z rodzajem i jakością stosowanych płuczek wiertniczych (Gautam 2022). Płuczki wiertnicze odgrywają kluczową rolę w procesie wiercenia w trudnych warunkach, ponieważ wykonują wiele zadań, w tym: chłodzenie narzędzi wiertniczych, transportowanie wydobytego urobku na powierzchnię, stabilizacja otworu wiertniczego oraz redukcja tarcia między narzędziami a otoczeniem geologicznym. Płuczki wiertnicze, aby mogły spełniać swoje funkcje w otworze, w warunkach HPHT, powinny charakteryzować się odpowiednio wysoką gęstością, warunkowaną równoważeniem ciśnienia złożowego i niepowodującą szczelinowania złoża, odpowiednimi parametrami reologicznymi, stabilnością oraz zdolnością do utrzymania materiału obciążającego w stanie zawieszenia zarówno w warunkach statycznych jak i dynamicznych (Bielewicz i in. 2015). Z tego powodu są one złożonymi mikro- i nanokompozytami polimerowo-mineralnymi o zróżnicowanym składzie chemicznym i mineralogicznym, a także zmiennym udziale fazy stałej, zdyspergowanej w środowisku wodnym (WBM – *water based mud*) lub niewodnym (*oil based mud* *synthetic based mud*) (Jamrozik i in. 2014).

W przypadku wierceń w warunkach HPHT przeważnie stosowane są płuczki wiertnicze na bazie olejowej. Są to zwykle inwersyjne emulsje, w których fazą rozproszoną jest woda, a fazą ciągłą oleje mineralne, syntetyczne bądź parafinowe. Obok fazy ciągłej i rozproszonej w technologii płuczek wiertniczych szczególne znaczenie dla prawidłowego postępu prac wiertniczych ma dobór odpowiedniego rodzaju fazy stałej.

Rodzaj i ilość fazy stałej zawartej w płuczce przekłada się na proces wiercenia i wpływa na takie parametry, jak: szybkość wiercenia (ROP), parametry hydrauliczne, współczynnik strat technologicznych (rozcieńczanie), moment obrotowy, udary ciśnienia, przyklejenia przewodu wiertniczego, utrata cyrkulacji, stabilność otworu oraz wibracje przewodu wiertniczego. Te z kolei wpływają na żywotność świrdrów, pomp i innych urządzeń mechanicznych oraz na koszt płuczki i systemów oczyszczania, co w konsekwencji decyduje o kosztach wiercenia otworu (Szczygieł i Jamrozik 2024). Typowy skład płuczki na bazie olejowej przedstawiono schematycznie na rysunku 1.



Rys. 1. Typowy skład płuczek wiertniczych na bazie olejowej
Źródło: opracowanie własne na podstawie: DACC (2014), Sanzone i in. (2016)

Rodzaj i ilość fazy stałej obecnej w płuczkach wiertniczych dobierana jest w zależności od rodzaju płuczki, właściwości reologicznych, jakości osadu filtracyjnego i kontroli filtracji, właściwości chemicznych i mechanicznych wiercenia. Jeśli wymagają tego warunki geologiczno-technologiczne wiercenia, gęstość płuczek na bazie olejowej jest zwiększana w wyniku zastosowania materiałów obciążających. Najczęściej stosowanym materiałem do regulacji ciężaru właściwego płuczek stosowanych do wierceń w warunkach HPHT jest baryt, który pozwala na osiągnięcie maksymalnej gęstości płuczki wynoszącej nawet 2516 kg/m^3 .

Niestety głównym problemem związanym ze stosowaniem materiałów obciążających jest to, że mają tendencję do sedymentacji grawitacyjnej zarówno w otworach pionowych, jak i odchylonych, co powoduje wahania gęstości, które ostatecznie wpływają na przechwycenia przewodu wiertniczego, utratę cyrkulacji, problemy związane z kontrolą ciśnienia w otworze, a w skrajnych przypadkach nawet zagrożenie erupcyjne (Ofei i in. 2020). Zjawisko to nazywane jest sedymentacją barytu (ang. *barite sagging*)

i definiowane jako współczynnik sedymentacji (ang. *sag factor*). Występowaniu zjawiska sedymentacji barytu sprzyjają wysoka gęstość płuczki, statyczne warunki, niska lepkość płuczki, występowanie w otworze wysokiego ciśnienia i wysokiej temperatury, a także właściwości fizyczne barytu, takie jak np. rozmiar cząstek czy też obecność w składzie płuczki nanomateriałów (Ofei i in. 2020, Adjei i in. 2023).

Wagle i inni (2015) udowodnili w swoich badaniach, że płuczki wiertnicze w postaci emulsji inwersyjnych, w których zastosowano modyfikatory reologii będące nanocząsteczkami, nie wykazywały tendencji do sedymentacji materiału obciążającego.

Przeprowadzone przez autorów badania laboratoryjne wykazały, że zastosowanie mikronizowanego barytu w połączeniu z nanomateriałami, jakim jest amino-atapulgit, pozwala na modyfikowanie właściwości płuczek w niskich wartościach właściwości reologicznych i szerokich zakresach ciężaru właściwego, wynoszącego nawet 2350 kg/m^3 . Dodatkowo zredukowany do minimum zostaje efekt sedymentacji barytu, co pozwala na uniknięcie problemów związanych ze zmianą gęstości płuczki wiertniczej podczas wiercenia otworu.

2. Materiał badawczy

Materiał badawczy stanowiły płuczki na bazie olejowej, będące emulsjami inwersyjnymi typu woda w oleju. Stosunek oleju do wody wynosił 95 : 5, zaś gęstość płuczki była równa 2350 kg/m^3 . Komponenty do płuczek zostały dostarczone przez firmę Chemfor Poland. Jako fazę ciągłą w tej emulsji zastosowano olej mineralny Escaid 110, firmy ExxonMobil, o właściwościach fizykochemicznych zestawionych w tabeli 1. Olej ten zawiera węglowodory C_{11} – C_{14} , n-alkany, izoalkany, cykloalkany oraz <2% węglowodorów aromatycznych. Oprócz oleju bazowego głównymi składnikami użytymi do przygotowania płuczek były: solanka chlorku wapnia, emulgatory CHEMVERT PE i CHEMVERT SE, środek zwilżający CHEMVERT WE. Płuczka obciążona była dwoma rodzajami barytu: barytem API oraz mikronizowanym barytem. W celu poprawy właściwości reologicznych płuczki do jej składu dodawany był nanomateriał, jakim jest organofilny amino-atapulgit produkowany przez firmę Elementis Specialites. Gęstość nasypowa materiału wynosi 600 kg/m^3 , ciężar właściwy – 2000 kg/m^3 . Zaletą tego materiału jest to, że łatwo dysperguje w rozpuszczalnikach niskopolarnych już przy umiarkowanej agitacji mechanicznej.

Mieszadło jednorzeczionowe Hamilton Beach zostało użyte do mieszania składników płuczki wiertniczej. Składniki mieszano z prędkością 6000 obr./min. W tabeli 2 przedstawiono skład badanych płuczek.

Tabela 1
Właściwości fizykochemiczne oleju Escaid 110
(ExxonMobil 2024)

Parametr	Jednostka	Wartość
Barwa	–	Bezbarwny
Zakres temperatury wrzenia	[°C]	180–270
Temperatura zapłonu	[°C]	74
Temperatura samozapłonu	[°C]	>200
Zakres destylacji	[°C]	192–248
Punkt anilinowy	[°C]	77
Szybkość parowania	–	0,01
Granica palności – górna/dolna	[% obj.] – procent objętościowy w powietrzu	7,0/0,6
Prężność par	[kPa] (0,75 mmHg) w 25°C	<0,1
Gęstość par	(pomiar w 101 kPa)	>1
Gęstość względna	[kg/m ³] (w 15°C)	771–871
Lepkość kinematyczna w (20°C/40°C)	[cSt] (mm ² /s)	2,0 /1,68
Ciężar cząsteczkowy	[G/Mol]	178

Tabela 2
Skład badanych płuczek będących emulsjami inwersyjnymi

Produkt	OBDF API	OBDF Mikro
Olej bazowy Escaid 110	+	+
Emulgator CHEMVERT PE	+	+
Organofilny amino-atapulgit	+	+
Modyfikator reologii CHEMVERT RM	+	+
Wapno	+	+
Emulgator CHEMVERT SE	+	+
Środek zwilżający CHEMVERT WE	+	+
Baryt API	+	–
Mikrobaryt	–	+

Metodyka badań

Kluczowym elementem prowadzonych badań było wykonanie testów laboratoryjnych parametrów reologicznych oraz stabilność płuczki na bazie olejowej z dodatkiem mikronizowanego barytu oraz organofilnego atapulgitu.

Analizę rozkładu wielkości cząstek mikronizowanego barytu stosowanego do obciążania płuczki na bazie olejowej wykonano z zastosowaniem metody dyfrakcji światła laserowego (LD) aparatem Mastersizer 2000 firmy Malvern Instr. Urządzenie wykorzystuje światło laserowe o długości fali 750 nm do pomiaru wielkości cząstek o średnicach od 0,04 μm do 2000 μm za pomocą dyfrakcji światła.

Badania laboratoryjne parametrów technologicznych płuczki wiertniczej przeprowadzono zgodnie z normami: PN-EN ISO 10414-2:2011, *Przemysł naftowy i gazowniczy – Badania polowe płynów wiertniczych – Część 2. Płyny na bazie oleju* oraz PN-EN ISO 10416:2020, *Przemysł naftowy i gazowniczy – Płyny wiertnicze – Badania laboratoryjne*.

Podatność płuczki na sedymentację barytu w pierwszej kolejności badano podczas pomiaru parametrów reologicznych. W tym celu mierzono lepkość plastyczną, granicę płynięcia i wytrzymałość strukturalną oraz dobrano model reologiczny. Doboru modelu reologicznego dokonano z wykorzystaniem autorskiego programu komputerowego Rheosolution, opracowanego w Katedrze Wiertnictwa i Geoinżynierii Wydziału Wiertnictwa, Nafty i Gazu AGH, który umożliwia automatyzację procesu wyznaczania optymalnego modelu reologicznego płuczki wiertniczej (Wiśniowski 2020). Współczynnik korelacji Pearsona (R) został użyty do doboru optymalnego modelu reologicznego. Jak zauważyli Adjei i inni (2023), równanie Herschela–Bulkleya (1) zapewnia lepszy model dla charakterystyki mechanizmu sedymentacji barytu. Testy lepkościomierzem obrotowym, wykonane przez Ofei i innych (2019), wykazały, że dynamiczna sedymentacja barytu jest ściśle skorelowana z szybkością ścinania przy krytycznej szybkości powyżej 0,1 s^{-1} , zgodnie ze wzorem Herschela–Bulkleya:

$$\tau = \tau_y + k(\dot{\gamma})^n \quad (1)$$

gdzie:

- τ – naprężenie ścinające,
- τ_y – granica plastyczności,
- k – współczynnik spójności,
- $\dot{\gamma}$ – szybkość ścinania,
- n – wskaźnik przepływu.

Stabilność emulsji inwersyjnych z dodatkiem barytu klasy API oraz mikrobarytu oceniono w warunkach statycznych za pomocą testu obliczającego współczynnik sedy-

mentacji barytu (ang. *sag factor*) oraz przy użyciu optycznego analizatora Turbiscan Lab., Formulaction.

Badanie sedymentacji barytu w statycznych warunkach przeprowadza się, sezonując płuczkę w celi pomiarowej w temperaturze 140°C przez 16 h. Następnie wylicza się współczynnik sedymentacji barytu, korzystając ze wzoru:

$$Sag\ factor = \frac{\delta_{dół}}{\delta_{dół} + \delta_{góra}} \quad (2)$$

gdzie:

$\delta_{dół}$ – gęstość płuczki na dnie naczynia pomiarowego,

$\delta_{góra}$ – gęstość płuczki w górnej części naczynia pomiarowego.

Analizator Turbiscan Lab., Formulaction jest urządzeniem wyposażonym w źródło światła podczerwonego o długości fali $\lambda = 880$ nm i dwa zsynchronizowane detektory. Detektor transmisji (umieszczony pod kątem 180°) odbiera światło, które przeszło przez próbkę, natomiast detektor rozpraszania wstecznego (umieszczony pod kątem 45°) odbiera światło odbite wstecznie od próbki. Wysoką rozdzielczość pomiaru zapewnia skanowanie próbki co 40 μ m. Regulacja częstotliwości skanów pozwala uzyskać profile destabilizacji w funkcji czasu. Czas jednego skanu wynosi 20 s.

Do oceny stabilności badanych układów operowano współczynnikiem TSI (*turbiscan stability index*). Pomiar współczynnika TSI prowadzono w temperaturze: 20°C, 40°C i 80°C.

Im niższa wartość indeksu TSI, tym taki układ jest bardziej stabilny i odwrotnie. TSI oblicza się wzorem:

$$TSI = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - x_{BS})^2}{n-1}} \quad (3)$$

gdzie:

n – liczba skanów,

x_i – intensywność światła rozpraszanego wstecznie w czasie skanowania i ,

x_{BS} – średnia intensywność światła rozpraszanego wstecznie.

3. Wyniki badań i ich dyskusja

O kondycji płuczek olejowych będących emulsjami inwersyjnymi typu woda w oleju decydują ich właściwości reologiczne oraz stabilność emulsji. Prawidłowo dobrana

stabilność emulsji gwarantuje brak rozdziału faz oraz utrzymanie materiałów obciążających w stanie zawieszenia. Stabilność emulsji analizowanej płuczki obciążanej barytem API wynosiła 1271 V. Właściwości reologiczne tej płuczki charakteryzowały się niską wartością granicy płynięcia – 2 Pa (por. tab. 3), pomimo że do składu płuczki dodany był modyfikator reologii – organofilny amino-atapulgit.

Tabela 3
Właściwości fizykochemiczne badanych płuczek

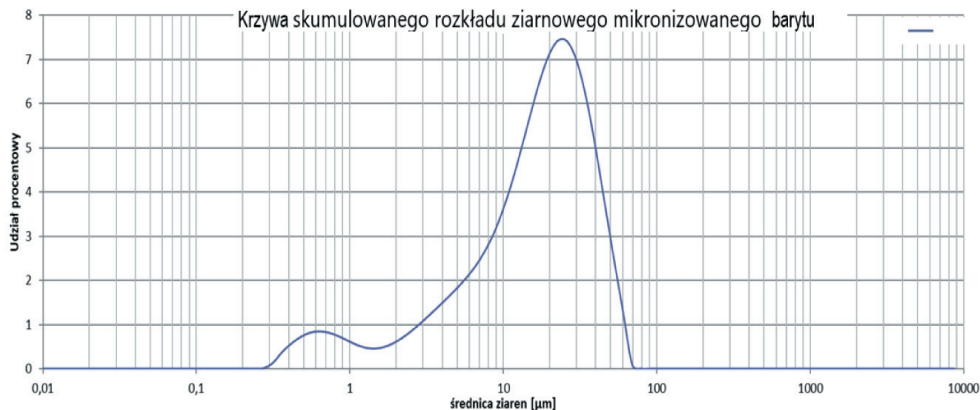
Parametry		Płuczka OBM API	Płuczka OBM Mikro
Temperatura pomiaru [°C]		50	50
Gęstość [kg/m ³]		2350	2350
Lepkość plastyczna wg Bingham PV [mPa·s]		66	47
Granica płynięcia YP [Pa]		2	18
Wytrzymałość strukturalna [Pa]	Gel 10 s	5	9
	Gel po 10 min	19	28
Granica płynięcia przy niskich prędkościach ścinania LSRYP [Pa]		1	3
Zawartość fazy stałej [%]		40	40
Zawartość oleju [%]		56,5	56,5
Zawartość wody [%]		3,5	3,5
Alkaliczność płuczki (Pom)		2,35	2,35
Grubość osadu API [mm]		nie mierzono	nie mierzono
Filtracja API [ml]		nie mierzono	nie mierzono
Stabilność emulsji [V]		1271	1574
<i>Sag factor</i>		0,545	0,527

Uzyskane wartości stabilności oraz granicy płynięcia płuczki obciążanej barytem API były na niewystarczającym poziomie, ponieważ skutkowało to sedymentacją barytu już podczas pomiarów właściwości reologicznych płuczki lepkościomierzem obrotowym OFITE 900.

Z powyższych względów przygotowano płuczkę, gdzie jako materiał obciążający zastosowano mikronizowany baryt, o rozkładzie ziarnowym przedstawionym na rysunku 2.

Analizując dane z wykresu umieszczonego na rysunku 2, można stwierdzić, że rozmiar cząstek mikronizowanego barytu zawiera się w przedziale od 3,0 µm (dolny decyl), średni rozmiar przypada na wielkość 19,0 µm (mediana) do 44 µm (górny decyl).

W świetle powyższego mikronizowany baryt w ponad 90% składa się z cząstek o rozmiarach 44 μm . Natomiast baryt API charakteryzuje się wielkością cząstek, gdzie górny decyl przypada na cząsteczki o rozmiarach 70 μm (Bielewicz 2015).



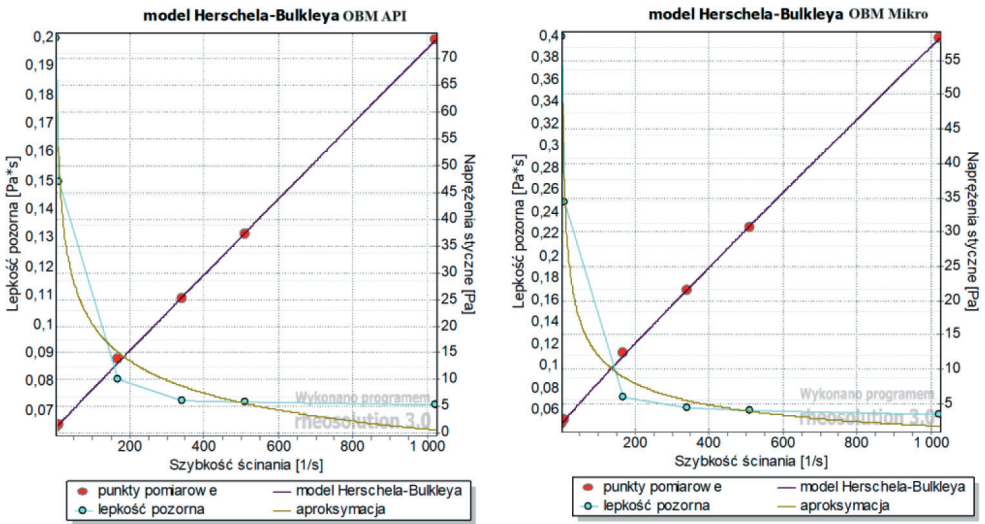
Rys. 2. Krzywa skumulowanego rozkładu ziarnowego mikrobarytu

Płuczka wiertnicza z mikronizowanym barytem charakteryzowała się znacznie mniejszą sedymentacją fazy stałej (*sag factor* dla tej płuczki wynosił 0,527) w porównaniu z płuczką obciążaną barytem API (*sag factor* miał wartość 0,545). *Sag factor* mierzony po kondycjonowaniu płuczki przez 16 h w 140°C definiowany jest jako bezpieczny, jeżeli jego wartość mieści się w granicach poniżej 0,530, co miało miejsce w przypadku płuczki obciążanej mikronizowanym barytem. Jeżeli *sag factor* jest powyżej 0,531, badanie to wskazuje na początek niestabilności w płuczce. Natomiast jeżeli wartość tego współczynnika jest wyższa niż 0,542, mamy wtedy do czynienia z niestabilnością płuczki inwersyjnej. Wówczas płuczka taka nie może zapewnić wystarczających warunków do zawieszenia barytu (Elkatatny 2018).

Zjawisko to można tłumaczyć właściwościami lepkością płuczek wiertniczych, które są definiowane głównie ze względu na wytrzymałość strukturalną oraz granicę płynięcia i odnoszą się do zdolności płuczki do utrzymania w stanie zawieszenia cząstek barytu. Płuczka z dodatkiem mikrobarytu miała wyższe wartości granicy płynięcia i wytrzymałości strukturalnej. Na uwagę zasługuje również znacznie niższa wartość lepkości plastycznej i lepkości pozornej w płuczce z mikrobarytem, zwłaszcza przy wysokich prędkościach ścinania (tab. 3, rys. 3), w porównaniu z płuczką z tradycyjnym materiałem obciążającym.

Niższa lepkość plastyczna przy tej samej wartości gęstości płuczki będzie skutecznie wpływać na zmniejszenie równoważnej gęstości cyrkulacji. Równoważna gęstość cyrkulacji ma bezpośrednie przełożenie nie tylko na przebieg wiercenia, ale również prawidłowy proces rurowania i cementowania otworu wiertniczego.

Należy również podkreślić, że mikronizowany baryt nie wpływał na zmianę modelu reologicznego analizowanych płuczek. Najlepiej dopasowanym modelem reologicznym, zarówno dla płuczek OBM API, jak i OBM Mikro, był model cieczy Herschela–Bulkleya (rys. 3). Współczynnik korelacji Pearsona dla tych płuczek wykazywał korelację pełną.



Rys. 3. Wykres zależności wartości lepkości pozornej od szybkości ścinania dla modelu Herschela–Bulkleya dla płuczki OBM z dodatkiem barytu API oraz mikronizowanego

Rozpatrując globalną stabilność statyczną badanych płuczek na podstawie współczynnika TSI, obliczonego zgodnie z równaniem (3), można zauważyć, w przypadku płuczek z dodatkiem barytu API, w zakresie temperatur do 40°C, emulsja nie wykazuje wzrostu dynamiki destabilizacji układu (tab. 4). Kiedy temperatura skanowania osiągnie 80°C, powoduje to znaczny (ponad czterokrotny) wzrost niestabilności układu. Natomiast w przypadku płuczek z dodatkiem mikrobarytu podwyższenie temperatury wpływa tylko w nieznaczny sposób na wzrost współczynnika TSI z poziomu 0,6 przy temperaturze 20°C do poziomu 1,4 w temperaturze 80°C.

Tabela 4

Zmiana wartości współczynnika TSI w temperaturze dla próbki płuczki na bazie olejowej obciążanej barytem API i mikronizowanym barytem

Temperatura pomiaru [°C]	20	40	8,0
Współczynnik TSI, płuczka OBM API	1,2	1,2	4,4
Współczynnik TSI, płuczka OBM Mikro	0,6	bp	1,4

Należy podkreślić, że im wyższa wartość TSI, tym szybciej cząstki barytu sedymentują w próbce płuczki, a tym samym mniej stabilna jest próbka emulsji w funkcji czasu. Badania współczynnika TSI potwierdzają, że próbka płuczki z mikrobarytem jest bardziej stabilna niż płuczka OBM API.

4. Wnioski

1. Płuczki olejowe zawierające w swym składzie mikronizowany baryt oraz organofilne nanomateriały w postaci amino-atapulgitu wykazują unikalny profil reologiczny w porównaniu z płuczkami obciążanymi barytem API.
2. Zastosowanie mikronizowanego barytu w technologii płuczek na bazie olejowej korzystnie wpływa na parametry reologiczne tych płuczek, jednocześnie nie powodując znacznej sedymentacji barytu.
3. W przypadku płuczki z dodatkiem barytu API współczynniki sedymentacji barytu oraz TSI były na wysokim poziomie, dyskwalifikującym tę płuczkę do zastosowania w otworze.
4. Szczególnie wysoka wartość lepkości przy niskich prędkościach ścinania sugeruje, aby stosować mikrobaryt oraz amino-atapulgit jako materiały wpływające na prawidłowe wynoszenie przez płuczkę zwiercin z dna otworu, a przede wszystkim zapobiegające sedymentacji barytu w obciążonych płuczkach na bazie olejowej.

Praca powstała w ramach projektu badawczego finansowanego ze środków programu „Inicjatywa Doskonałości – Uczelnia Badawcza” dla Akademii Górniczo-Hutniczej w Krakowie.

Literatura

- Adjei S., Elkatatny S., Adams Sokama-Neuyam Y., Sarkodie K., Atuquaye Quaye J., 2023, *Evaluation and remediation techniques for barite sagging: A review*, Geoenergy Science and Engineering, vol. 225, art. 211731, <https://doi.org/10.1016/j.geoen.2023.211731>.
- Bielewicz D., Dudek A., Goc A., Herman Z., 2015, *Technologia płuczek wiertniczych*, [w:] Rychlicki S. (red. nac.), Stryczek S. (red. tomu), *Poradnik górnika naftowego: praca zbiorowa*, t. 2: *Wiertnictwo*, Stowarzyszenie Naukowo-Techniczne Inżynierów i Techników Przemysłu Naftowego i Gazowniczego, Kraków, s. 637–708.
- DACC – Drilling and Completion Committee, 2014, *An Industry Recommended practice (IRP) – IRP 14: Non-Water Based Drilling Fluid*, vol. 14, <https://www.energysafetycanada.com/Resource/DACC-IRP-Volumes/DACC-IRP-VOLUME-14-NON-WATER-BASED-DRILLING-FLUIDS> [dostęp: 18.03.2024].

- Elkatatny S., 2018, *Enhancing the Stability of Invert Emulsion Drilling Fluid for Drilling in High-Pressure High-Temperature Conditions*, *Energies*, vol. 11, art. 2393, <https://doi.org/10.3390/en11092393>.
- ExxonMobil, 2024, *Escaid™ 110 Fluid Product Safety Summary*, https://www.exxonmobilchemical.com/en/resources/library/library-detail/2501/escaid_110_fluid_product_safety_summary [dostęp: 18.03.2024].
- Gautam S., 2022, *A state of the art review on the performance of high-pressure and high-temperature drilling fluids: Towards understanding the structure-property relationship of drilling fluid additives*, *Journal of Petroleum Science and Engineering*, vol. 213, art. 110318, <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2022.110318>.
- Jamrozik A., Gonet A., Fijał J., Terpiłowski K., Czekaj L., 2014, *Analysis of waste mud stability*, *AGH Drilling, Oil, Gas*, vol. 31, no. 1, s. 25–38, <https://doi.org/10.7494/drill.2014.31.1.25>.
- McKinsey & Company, 2024, *Global Energy Perspective 2024*, September 2024, <https://www.mckinsey.com/industries/energy-and-materials/our-insights/global-energy-perspective#/> [dostęp: 9.11.2024].
- Ofei T.N., Lund B., Saasen A., Sangesland S., Linga H., Gyland K.R., Kawaji M., 2020, *Barite Sag Measurements*, [w:] *IADC/SPE International Drilling Conference and Exhibition held in Galveston, Texas, 3–5 March 2020*, IADC/SPE-199567-MS.
- Ofei T.N., Saasen A., 2019, *A New Approach to Dynamic Barite Sag Analysis on Typical Field Oil-Based Drilling Fluid*, *Annual Transactions of the Nordic Rheology Society*, vol. 27, s. 61–69.
- PN-EN ISO 10414-2:2011, *Przemysł naftowy i gazowniczy – Badania polowe płynów wiertniczych. Część 2. Płyiny na bazie oleju*, Polski Komitet Normalizacyjny, Warszawa.
- PN-EN ISO 10416:2020, *Przemysł naftowy i gazowniczy – Płyiny wiertnicze – Badania laboratoryjne*, Polski Komitet Normalizacyjny, Warszawa.
- Sanzone D.M., Naff J., M, Vinhateiro N., 2016, *Environmental Fates and Effects of Ocean Discharge of Drill Cuttings and Associated Drilling Fluids From Offshore Oil and Gas Operations*, International Association of Oil & Gas Producers (IOGP) Report 543, AECOM, https://www.researchgate.net/publication/299285673_Environmental_Fates_and_Effects_of_Ocean_Discharge_of_Drill_Cuttings_and_Associated_Drilling_Fluids_From_Offshore_Oil_and_Gas_Operations.
- Szczygieł A., Jamrozik A., 2024, *Pluczki do wierceń geotermalnych – kluczowe kryteria doboru*, *Wiadomości Naftowe i Gazownicze*, nr 1 (299).
- Wagle V., Alyami A., AlAbdullatif Z., 2015, *Using Nanoparticles to Formulate Sag-Resistant Invert Emulsion Drilling Fluids*, [w:] *Proceedings of the SPE/IADC Drilling Conference and Exhibition*, London, UK, 17–19 March, <http://doi.org/10.2118/173004-MS>.
- Wiśniowski R., 2020, *Selection of a Suitable Rheological Model for Drilling Fluid Using Applied Numerical Methods*, *Energies*, vol. 13, art. 3192, <http://doi.org/10.3390/en13123192>.

Kształtowanie właściwości powierzchniowych materiałów polimerowych stosowanych w implantologii

Stanisława Kluska¹ , Jadwiga Skoczek²

¹ AGH Akademia Górniczo-Hutnicza, Wydział Inżynierii Materiałowej i Ceramiki, Kraków

² Absolwentka AGH Akademia Górniczo-Hutnicza, Wydział Inżynierii Materiałowej i Ceramiki, Kraków

Streszczenie: Skuteczne i często stosowane do modyfikacji powierzchni materiałów polimerowych są metody obróbki plazmowej. Pozwalają one na selektywną zmianę właściwości powierzchni, takich jak np. biokompatybilność, chropowatość, swobodna energia powierzchniowa czy stopień zwilżalności, podczas gdy pozostałe cechy materiału pozostają niezmienione. Zmiany w charakterystyce powierzchni dzięki wykorzystaniu plazmy generowanej, np. zewnętrznym polem o częstotliwości radiowej 13,56 MHz (technika *radio frequency chemical vapour deposition*), mogą wynikać z powstania nowych struktur chemicznych w warstwie wierzchniej materiału. Przeprowadzono modyfikację plazmochemiczną polimerów biomedycznych: półkryształicznego, termoplastycznego polimeru znanego pod nazwą polieteroeteroketon PEEK oraz poliuretanu PU w celu zmiany i poprawy właściwości powierzchni tych materiałów. Powierzchnie polimerów zostały modyfikowane przez trawienie jonowe w plazmie niskotemperaturowej w atmosferze Ar, N₂, O₂ przez 900 s.

Modyfikowane biopolimery scharakteryzowano pod względem składu chemicznego i morfologii powierzchni. Wykonano również pomiary swobodnej energii powierzchniowej. Zmiany w topografii powierzchni i zwiększenie nierówności zaobserwowano dla obu materiałów modyfikowanych w plazmie N₂. Największy wzrost składowej polarnej energii powierzchniowej obserwowano w przypadku PEEK modyfikowanego w plazmie tlenowej, zaś w przypadku PU – w atmosferze Ar.

Słowa kluczowe: modyfikacja powierzchni, metoda PECVD, trawienie jonowe powierzchni, polimery biomedyczne

SURFACE PROPERTIES FORMATION OF POLYMERIC MATERIALS USED IN IMPLANTOLOGY

Abstract: Effective and frequently used surface modification methods for polymeric materials are plasma treatment methods. They allow the selective modification of surface properties such as, for example, biocompatibility, surface roughness, surface free energy or degree of wettability, while other material characteristics remain unchanged. Changes in surface characteristics, due to the use of plasma generated, for example, by an external field at 13.56 MHz (Radio Frequency Chemical Vapour Deposition technique), can result from the formation of new chemical structures in the surface layer of the material. In this study, plasmachemical modification of biomedical polymers; a semi-crystalline, thermoplastic polymer known as polyetheretherketone PEEK and polyurethane PU were carried out to improve the surface properties of these materials. The surfaces of the polymers were modified by ion etching in low - temperature plasma in an Ar, N₂, O₂ atmosphere for 900 s.

The modified biopolymers were characterised in terms of chemical composition, surface morphology as well as surface free energy measurements. Changes in surface topography and an increase in roughness were observed for both materials modified in N₂ plasma. The largest increase in the polar component of the surface energy was observed for PEEK modified in oxygen plasma, for PU in Ar atmosphere

Keywords: surface modification, PECVD method, surface ion etching, biomedical polymers

1. Wprowadzenie

Obserwowany w ostatnich latach znaczący rozwój inżynierii materiałowej związany jest z rosnącym zapotrzebowaniem na różnego rodzaju materiały, które mogą być stosowane w medycynie. Wykorzystywane są one przede wszystkim w implantologii, chirurgii, ortopedii, stomatologii, okulistyce, inżynierii tkankowej, a także do produkcji oprzyrządowania medycznego oraz systemów kontrolowanego dostarczania leków (DDS – *Drug Delivery System*). Materiał taki musi być biozgodny, nietoksyczny oraz powodować minimalną odpowiedź układu immunologicznego. Może być wykonany z metali, polimerów, ceramiki albo stanowić kompozyt. Biorąc pod uwagę właściwości mechaniczne, łatwość produkcji i modyfikacji powierzchni, jak również aspekt ekonomiczny, na szczególną uwagę zasługują biomateriały polimerowe. Przykładami polimerów, które znalazły zastosowanie biomedyczne, są: PA (poliamid), PE (polietylen), PET (politereftalan etylenu), PEEK (polieteroeteroketon), PLA (polilaktyd), PU (poliuretan), PTFE (politetrafluoroetylen), PMMA (polimetakrylan metylu), PSU (polisulfon) i PGA (polikwas glikolowy). Wśród kompozytów można wymienić na przykład: HAp-PEEK, CRF/PEEK, CRF/UHMWPE, CRF/żywica epoksydowa (Banoriya i in. 2017, Lhotská i in. 2024). Zastosowanie materiałów polimerowych w stosunkowo nowej dziedzinie, jaką jest inżynieria tkankowa, są niezwykle obiecujące. W tej dziedzinie polimery wykorzystywane są do wspomagania regeneracji trójwymiarowych struktur tkanek i narządów (Griffith 2000, Ferreira i in. 2015). O wykorzystaniu w medycynie danego tworzywa decydują przede wszystkim jego właściwości powierzchniowe, które związane są z jego mikrostrukturą, topografią i chemią. To właśnie powierzchnia materiału pozostaje w bezpośrednim kontakcie z organizmem, oddziałuje z nim i ma wpływ na odpowiedź układu odpornościowego. Bardzo istotnym czynnikiem przy produkcji biomateriałów jest możliwość modyfikacji warstwy zewnętrznej. W celu otrzymania materiału o pożądanych parametrach i określonej wytrzymałości mechanicznej należy dobrać odpowiednią metodę obróbki. W przypadku tworzyw polimerowych bardzo często stosowane są techniki plazmochemiczne, ponieważ umożliwiają modyfikację w szerokim zakresie, a także pozwalają kształtować powierzchnię w stosunkowo niskiej temperaturze, bez napromieniowania i konieczności stosowania silnie reaktywnych odczynników. Ponadto możemy uzyskać biomateriały o różnorodnym kształcie przy jednoczesnym zachowaniu cech makroskopowych próbki. Plazma niskotemperaturowa jest jedną z ważnych technologii obróbki powierzchniowej, która zmienia strukturę powierzchni polimeru, a przy dłuższym stosowaniu ma również wpływ na topografię powierzchni. Plazma współdziała z powierzchnią polimeru, tworząc warstwę o innej morfologii powierzchni i poprawiając adhezję. W przypadku modyfikacji powierzchni biomateriałów dąży się m.in. do poprawy kontaktu biomateriału z tkanką, np. przez zwiększenie adhezji komórek (Szymaniak i in. 2018).

W pracy przedstawiono wyniki badań powierzchni polimerów PEEK (polieteroeteroketonu) i PU (poliuretanu) po procesie trawienia jonowego w różnych atmosferach. Badania te obejmowały pomiary kąta zwilżania, energii powierzchniowej, mikrostruktury i składu chemicznego powierzchni oraz pomiary chropowatości powierzchni.

1.1. Metody plazmochemiczne

kształtowania właściwości powierzchniowych materiałów polimerowych

Czynnikami wpływającymi na właściwości mechaniczne, rozkład sił, pierwotną stabilizację implantów są nie tylko ich kształty, wymiary i połączenia implantów z protezą, ale również morfologia ich powierzchni, makrostruktura, mikrostruktura i nanostruktura (włączając wynikające z nich właściwości fizyczne i chemiczne) oraz homogeniczność. Aby zapewnić lepszą integrację implantu z kością, wykonuje się różnego rodzaju zabiegi w skali mikro, zmieniające warstwę wierzchnią powierzchni. Wykonuje się także zabiegi, które prowadzą do zmian na poziomie nanostruktury, dzięki którym można poprawić fizykochemiczne właściwości powierzchni, biochemiczne zachowanie oraz adhezję komórek (Ratner i Castner 1997). Biomateriały polimerowe charakteryzują się bardzo dobrymi właściwościami fizykochemicznymi, łatwością w obróbce i niskimi kosztami wytwarzania. Jednak właściwości ich powierzchni często nie osiągają wymagań jakościowych, które są im stawiane. Dlatego, aby uzyskać polimery o określonych parametrach, należy nie tylko dobrać odpowiedni skład chemiczny i zbiór innych właściwości materiału, ale także przygotować ich powierzchnię. Obróbka powierzchni materiałów polimerowych jest bardzo istotna przy produkcji implantów. Modyfikacja powierzchni tych materiałów prowadzi do wzrostu twardości oraz poprawy właściwości tribologicznych – odporność na zarysowanie, działanie promieniowania UV i środków chemicznych. Dzięki niej zmienia się również zwilżalność materiału – wzrasta hydrofiliowość lub hydrofobowość. Wszelkie zmiany własności powierzchni spowodowane są usuwaniem defektów powierzchniowych, zanieczyszczeń powstających w czasie procesu wytwórczego bądź na skutek działania otoczenia. Ponadto obróbka powierzchniowa wpływa na rozwinięcie rzeczywistej powierzchni materiału i wzrost energii swobodnej.

W ostatnich latach można zaobserwować dynamiczny rozwój technologii kształtowania powierzchni materiałów polimerowych za pomocą zimnej plazmy. Jest to związane z tym, że metody takie są szybkie, czyste i ekologiczne, a także pozwalają na prowadzenie procesów w stosunkowo niskich temperaturach otoczenia oraz przy ciśnieniu atmosferycznym (Florjańczyk i in. 1998). Do zalet technik plazmochemicznych można zaliczyć również to, że plazma działa zwykle na głębokości około kilkudziesięciu nanometrów, w związku z czym nie ma wpływu na właściwości materiałów polimerowych w masie. Ponadto cząsteczki plazmy mogą modyfikować powierzchnię wszystkich polimerów, niezależnie od ich reaktywności czy struktury, nie występują pozostałości

rozpuszczalnika na powierzchni oraz zjawiska pęcznienia substratów, a także modyfikacja polimeru jest równomierna na całej powierzchni (Bryjak i in. 2009). W przypadku metod plazmochemicznych istnieje również możliwość sterowania w szerokim zakresie parametrami plazmy, takimi jak: ciśnienie, skład chemiczny stosowanego gazu roboczego, struktura pola elektromagnetycznego, geometria wyładowania, moc układu zasilającego, napięcie, częstotliwość. Plazmę niskotemperaturową można otrzymywać na wiele sposobów, na przykład wykorzystując wiązkę elektronów bądź jonów, wyładowanie elektryczne, wysoką temperaturę, promieniowanie laserowe lub ciche wyładowania do uzyskania plazmy barierowej (Tyczkowski 1990). Do modyfikowania materiałów polimerowych najczęściej stosuje się metodę z wykorzystaniem wyładowania jarzeniowego.

2. Materiał i metodyka badań

W prezentowanym artykule przeprowadzono modyfikację powierzchni polimerów PEEK i PU poprzez trawienie jonowe w atmosferze Ar, N₂ i O₂ przez 15 min. PEEK zaliczany jest do grupy syntetycznych polimerów termoplastycznych, a dokładniej polioloketonów (4). Sklasyfikowany jest jako homopolimer liniowy, policykliczny, aromatyczny (Kurtz 2012, Ma i Tang 2014). Po raz pierwszy został opracowany przez grupę angielskich naukowców w 1978 r. PEEK stał się alternatywą dla stopów metali w zastosowaniach ortopedycznych. Posiada doskonałe właściwości mechaniczne, a także cechuje się brakiem toksycznego oddziaływania na organizm (Chen i in. 2016). Po raz pierwszy został zastosowany w ortopedii w latach 80. do stabilizacji urazów wewnętrznych oraz kości udowych (Ma i in. 2021). Ze względu na wysoką wytrzymałość w zastosowaniach ortopedycznych wykorzystywany jest jako materiał na protezy stawu biodrowego, jak również w chirurgii kręgosłupa. Implanty wykonane z PEEK wykorzystywane są również jako materiały do rekonstrukcji części szczękowo-twarzowych i czaszkowych (Panayotov i in. 2016). W ostatnich latach oprócz zastosowania czystego materiału polimerowego, do poprawy m.in. osteointegracji, wykorzystuje się materiały kompozytowe na bazie PEEK. Kompozytami najczęściej stosowanymi do produkcji implantów są włókna węglowe – PEEK oraz HAp – PEEK (Ma i in. 2021).

Drugi poddany modyfikacji materiał PU zaliczany jest do grupy elastomerów liniowych lub usieciowanych. W zależności od monomerów biorących udział w reakcji polimeryzacji, poliuretany można podzielić na niedegradowalne lub degradowalne (Wendels i Avérous 2021, Shelke i in. 2014). Cechą charakterystyczną budowy poliuretanów jest obecność w ich łańcuchu głównym grup uretanowych -NH-CO-O- (Błażewicz i Marciniak 2016). Biomateriały na bazie poliuretanów wykorzystywane są najczęściej do opatrywania ran, jako elementy sztucznego serca, cewniki oraz protezy

naczyniowe (Varma i Gopi 2020). W szczególności poliuretany termoplastyczne stanowią interesującą grupę materiałów, wykorzystywanych do produkcji sztucznych zastawek serca. Ze względu na dobrą biogodność i właściwości mechaniczne oraz brak wywoływania zjawiska trombogenności krwi powierzchnie komory sztucznej zastawki serca, stykające się z przepompowywaną krwią, pokrywane są często warstwą poliuretanową (Szlezyngier i Brzozowski 2012).

Powierzchnię próbek PEEK o wymiarach 15 mm × 15 mm × 2 mm przed procesem trawienia jonowego polerowano za pomocą diamentowych past polerskich DP-Allegro 9 μm, DP-Dac 3 μm oraz DP-Nap 1 μm. Następnie oczyszczono powierzchnię próbek przy wykorzystaniu alkoholu izopropylowego oraz płuczki ultradźwiękowej Polsonic®. Podłoża z poliuretanu o wymiarach 15 mm × 15 mm × 10 mm przemyto alkoholem izopropylowym oraz umieszczono w płuczce ultradźwiękowej na 10 min. Przeprowadzono proces trawienia jonowego w różnych atmosferach gazowych (Ar, N₂, O₂) za pomocą plazmy generowanej polem zewnętrznym o częstotliwości radiowej 13,56 MHz. Warunki procesu trawienia jonowego przedstawiono w tabeli 1.

Tabela 1
Warunki procesu trawienia jonowego podłoży PEEK oraz PU

Proces	Przepływ reagentów gazowych [cm ³ /min]	Ciśnienie [Pa]	Moc generatora fal radiowych [W]	Czas [min]	Temperatura podłoża [°C]
Trawienie jonowe	Ar/150	53	80	15	24
	N ₂ /150				
	O ₂ /150				

Po trawieniu jonowym w różnych atmosferach gazowych wykonano badania morfologii powierzchni polimerów PEEK, PU przy użyciu ultra wysokorozdzielczego, elektronowego mikroskopu skaningowego z emisją polową (Nova NANOSEM 200, FEI Company, USA) oraz ustalono skład chemiczny za pomocą mikroanalizy rentgenowskiej z dyspersją energii (EDS). Obserwacje zmian topografii powierzchni po procesie modyfikacji w plazmie wykonano z użyciem mikroskopu konfokalnego (3D Measuring Laser Microscope LEXT OLS4000, Olympus). Pomiary kąta zwilżania przeprowadzono za pomocą goniometru (DSA25, Krüss). Swobodną energię powierzchniową wyznaczono metodą OWRK (*owens, wendt, rabel, kaelble*), stosując dwie ciecze pomiarowe wodę i diiodometan. Badania chropowatości powierzchni analizowanych próbek wykonano profilometrem (Hommelwerke T1000, Jenoptik). Długość odcinka pomiarowego wynosiła 4,80 mm.

3. Wyniki badań

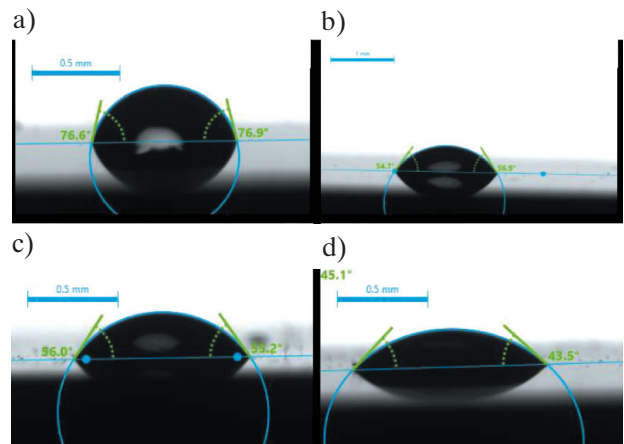
3.1. Zwilżalność

Wartości kąta zwilżania i swobodnej energii powierzchniowej po procesie modyfikacji plazmochemicznej w różnych atmosferach gazowych zostały przedstawione w tabeli 2.

Tabela 2
Wyniki pomiarów kąta zwilżania (Θ), całkowitej energii powierzchniowej (γ_c) oraz jej składowej dyspersyjnej (γ_d) i polarnej (γ_p) dla próbek PEEK oraz PU przed obróbką plazmową i po obróbce plazmowej

Materiał		Kąt zwilżania θ [°]		Energia powierzchniowa γ [mJ/m ²]		
		woda	dijodometan	γ_c	γ_d	γ_p
PEEK	wyjściowy	76,64 ±2,71	40,07 ±4,45	44,25 ±3,37	39,58 ±2,24	4,67 ±1,13
	trawiony w Ar	55,59 ±8,74	40,65 ±3,97	54,34 ±7,06	39,28 ±2,02	15,05 ±5,04
	trawiony w N ₂	55,90 ±3,26	43,05 ±7,21	53,43 ±6,23	38,04 ±3,78	15,38 ±2,45
	trawiony w O ₂	48,98 ±3,56	38,34 ±2,41	58,79 ±3,30	40,43 ±1,18	18,36 ±2,11
PU	wyjściowy	99,04 ±2,63	64,28 ±3,93	27,02 ±2,77	26,11 ±2,25	0,91 ±0,52
	trawiony w Ar	69,19 ±4,53	43,54 ±1,18	46,13 ±2,80	37,79 ±0,62	8,35 ±2,18
	trawiony w N ₂	74,16 ±2,39	51,08 ±4,61	40,93 ±3,94	33,67 ±2,59	7,26 ±1,35
	trawiony w O ₂	101,06 ±3,30	61,46 ±2,79	28,19±2,02	27,74 ±1,60	0,46 ±0,41

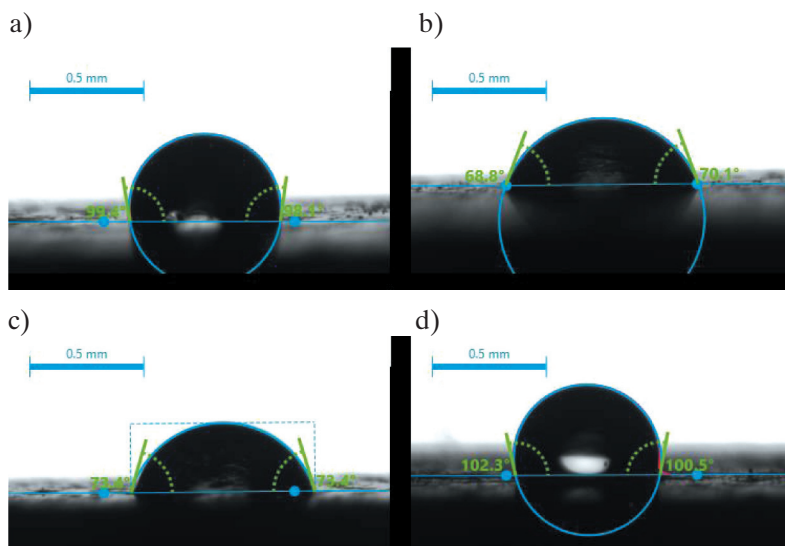
Przykładowe obrazy kształtu kropli wody na powierzchni PEEK zostały umieszczone na rysunku 1.



Rys. 1. Kształt kropli wody na powierzchni próbki PEEK: a) niemodyfikowanej; b) poddanej trawieniu jonowemu w atmosferze Ar; c) trawionej w atmosferze N₂; d) trawionej w atmosferze O₂

W przypadku wszystkich próbek PEEK przeprowadzone modyfikacje w różnych atmosferach gazowych spowodowały zmniejszenie kąta zwilżania powierzchni oraz wzrost swobodnej energii powierzchniowej (głównie składowej polarnej). Największe zmiany stopnia zwilżalności powierzchni zauważalne są w próbkach modyfikowanych w atmosferze tlenu. Zaobserwowano spadek wartości kąta zwilżania o około 28° w stosunku do próbki wyjściowej. Natomiast wartość swobodnej energii powierzchniowej dla tego polimeru zwiększa się od wartości $44,25 \text{ mJ/m}^2$ do wartości $58,79 \text{ mJ/m}^2$. Zwiększenie wartości swobodnej energii powierzchniowej wynika głównie ze zmiany składowej polarnej (γ_p), której wartość wzrosła blisko pięciokrotnie w stosunku do składowej polarnej energii powierzchniowej próbki niemodyfikowanej ($4,67 \text{ mJ/m}^2$). Zmiana ta może wynikać z powstawania na powierzchni próbki PEEK modyfikowanej w atmosferze tlenu polarnych grup funkcyjnych (Zhang i in. 2011).

Zastosowanie modyfikacji powierzchni plazmą o częstotliwości $13,56 \text{ MHz}$ w przypadku próbek PU spowodowało zmianę zwilżalności powierzchni w przypadku dwóch atmosfer reakcyjnych (atmosfery zawierającej azot oraz atmosfery argonu). Zastosowanie tlenu jako gazu reakcyjnego nie wpłynęło na zmianę stopnia zwilżania powierzchni (rys. 2).



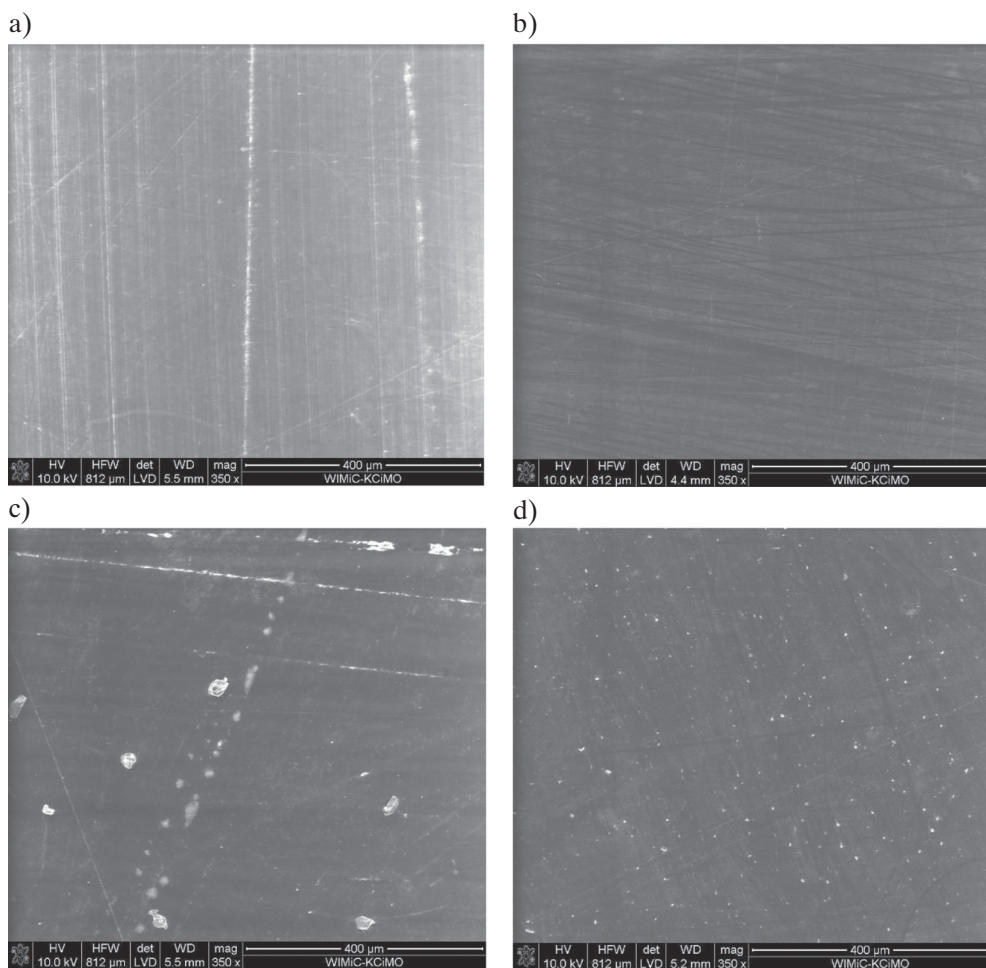
Rys. 2. Kształt kropli wody na powierzchni próbki PU: a) wyjściowej; b) trawionej w atmosferze Ar; c) trawionej w atmosferze N₂; d) trawionej w atmosferze O₂

Otrzymane wartości kąta zwilżania oraz swobodnej energii powierzchniowej, wynoszące odpowiednio $101,06^\circ$ oraz $28,19 \text{ mJ/m}^2$, są bardzo zbliżone do wartości uzyskanych dla próbki niemodyfikowanej i mieszczą się w granicach błędów pomiaru. Największe zmiany wynikające z trawienia jonowego można zaobserwować w próbce poddanej

działaniu atmosfery reakcyjnej zawierającej azot. Ze względu na wartość kąta zwilżania niemodyfikowanej próbki PU na poziomie $99,04^\circ$, w porównaniu z wartością po procesie modyfikacji ($74,16^\circ$), można zauważyć zmianę w charakterze zwilżania powierzchni przez ciecz. Modyfikacja plazmą niskotemperaturową pozwoliła na przekształcenie powierzchni hydrofobowej w hydrofilową.

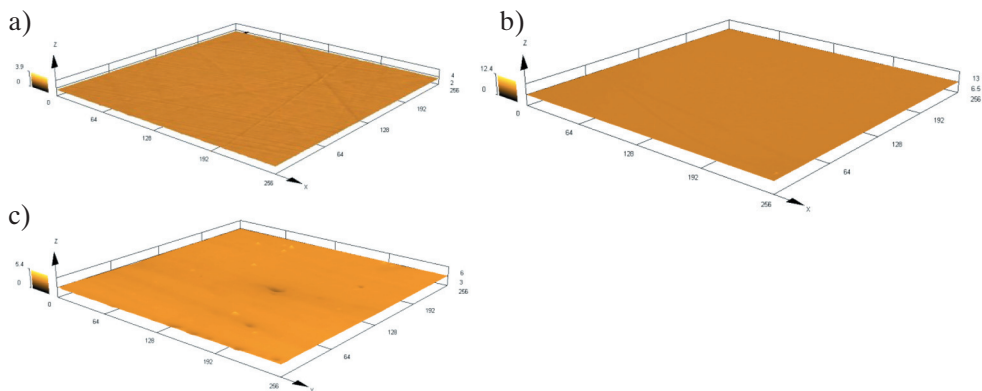
3.2. Topografia, morfologia powierzchni podłoży PEEK i PU po procesie modyfikacji plazmochemicznej

Obrazy SEM powierzchni niemodyfikowanej próbki PEEK oraz próbek poddanych trawieniu jonowemu w różnych atmosferach gazowych przedstawiono na rysunku 3.



Rys. 3. Obrazy SEM powierzchni PEEK: a) niemodyfikowanej; b) trawionej w atmosferze Ar; c) trawionej w atmosferze N_2 ; d) trawionej w atmosferze O_2

Powierzchnia niemodyfikowanych podłoży PEEK charakteryzuje się nieregularnymi zarysowaniami (bruzdami), które mogły powstać w trakcie obróbki mechanicznej materiału lub na etapie np. formowania wtryskowego. Proces trawienia jonowego w atmosferze Ar doprowadził do większego uwidocznienia wgłębień na powierzchni próbki. Natomiast modyfikacja plazmą w atmosferze azotu oraz tlenu zmieniła topografię powierzchni. Zmiany te widoczne są na profilach 3D fragmentów powierzchni. Rysunek 4 przedstawia profile 3D powierzchni próbki niemodyfikowanej oraz trawionej jonowo w atmosferze Ar oraz O_2 . W przypadku próbki modyfikowanej w argonie jej powierzchnia stała się bardziej wygładzona. Zastosowanie modyfikacji plazmą w atmosferze tlenu doprowadziło do najbardziej istotnych zmian w ukształtowaniu powierzchni. Miejscowo na powierzchni próbki powstały wgłębienia.

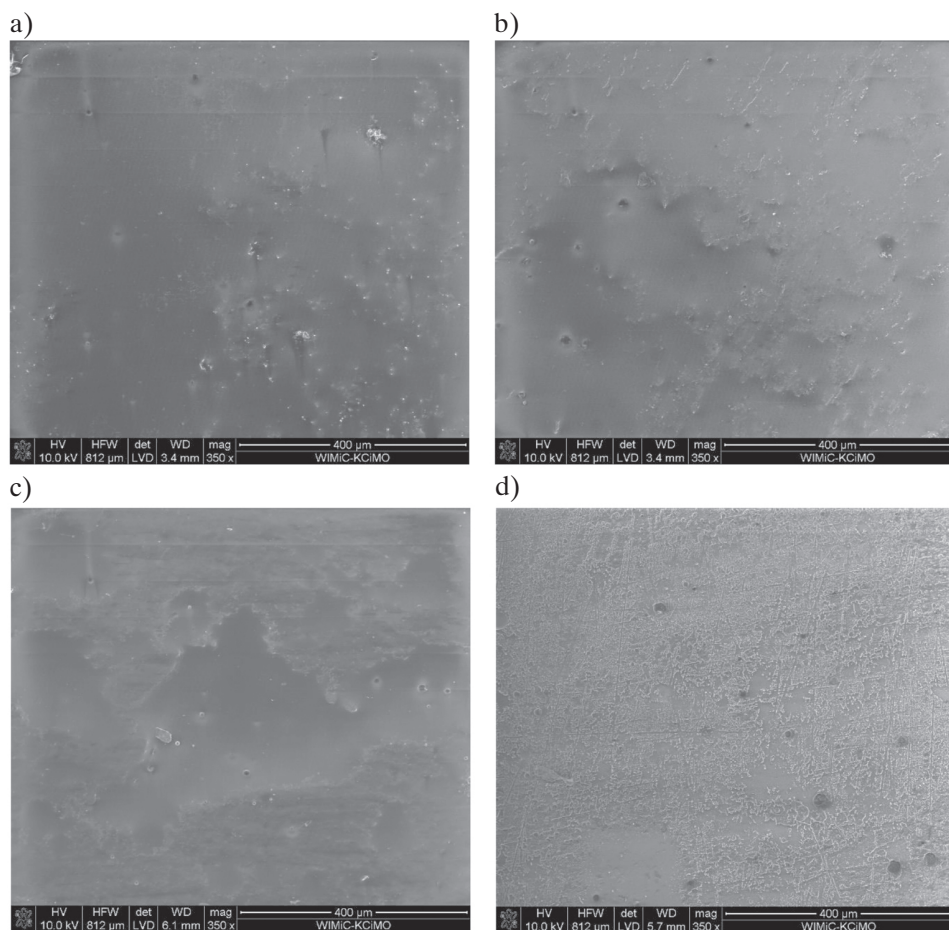


Rys. 4. Model 3D fragmentu powierzchni PEEK: a) niemodyfikowanej; b) trawionej w atmosferze Ar; c) trawionej w atmosferze O_2

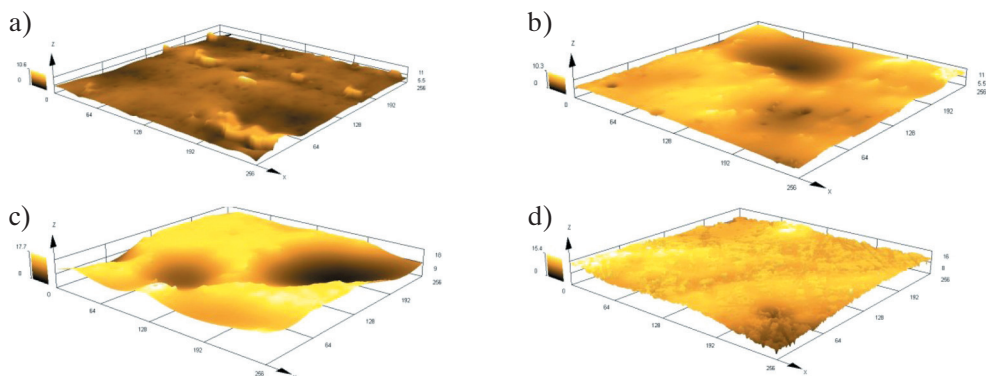
Obrazy SEM powierzchni badanych próbek PU przedstawiono na rysunku 5. Na niemodyfikowanej próbce poliuretanu oraz próbkach trawionych jonowo w różnych atmosferach gazowych można zauważyć zróżnicowaną fakturę ich powierzchni.

Warstwa wierzchnia niemodyfikowanego PU charakteryzuje się zgrubieniami w pewnych obszarach, które mogły powstać na etapie produkcji materiału/polimeru. Zgrubienia te widoczne są szczególnie na profilu trójwymiarowym powierzchni (rys. 6). W przypadku powierzchni próbki PU, modyfikowanej w atmosferze argonu, można zaobserwować największy stopień regularności w porównaniu z próbkami modyfikowanymi w atmosferze azotu lub tlenu (rys. 6b). Warstwa wierzchnia PU trawionego jonowo w atmosferze azotu cechuje się obszarami o dużym stopniu nierówności (rys. 6c). W przypadku trawienia jonowego w atmosferze tlenu powierzchnia PU uległa miejscowemu wytrawieniu (rys. 6d).

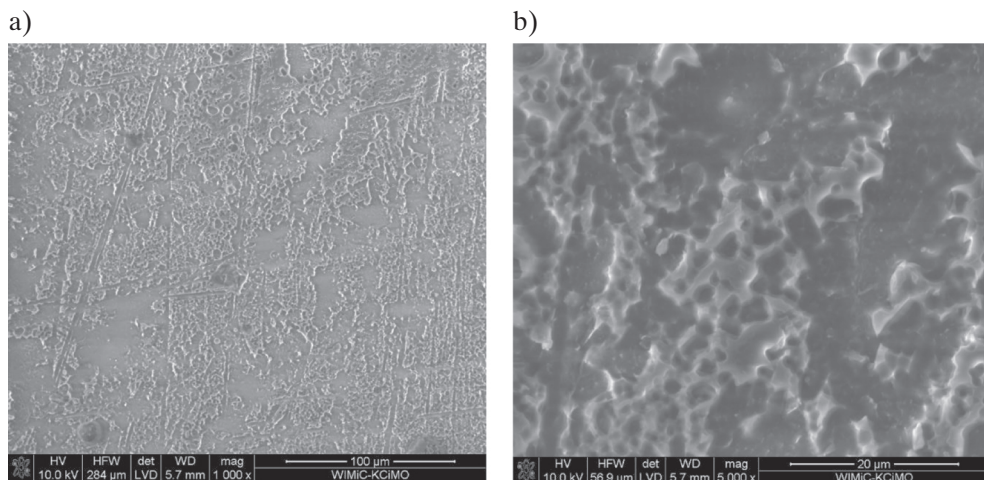
Powierzchnię próbek PU, po procesie trawienia jonowego w atmosferze tlenu, zobrazowano również przy powiększeniach: 1000 razy i 5000 razy (rys. 7).



Rys. 5. Obraz SEM powierzchni próbki PU: a) niemodyfikowanej; b) trawionej w atmosferze Ar; c) trawionej w atmosferze N₂; d) trawionej w atmosferze O₂



Rys. 6. Model 3D fragmentu powierzchni PU: a) niemodyfikowanej; b) trawionej w atmosferze Ar; c) trawionej w atmosferze N₂; d) trawionej w atmosferze O₂



Rys. 7. Obrazy SEM powierzchni próbki PU modyfikowanej w atmosferze tlenu:
a) przy powiększeniu 1000 razy; b) przy powiększeniu 5000 razy

3.3. Chropowatość powierzchni

Wartości parametru chropowatości R_a dla badanych próbek PEEK oraz PU przedstawiono w tabeli 3. W przypadku modyfikacji plazmochemicznej powierzchni PEEK można zaobserwować największą zmianę profilu chropowatości powierzchni dla próbki modyfikowanej w atmosferze azotu. Parametr R_a uzyskany dla powierzchni PEEK trawionej jonowo w tej atmosferze zmniejszył się w stosunku do wartości uzyskanej dla próbki niemodyfikowanej. Na powierzchni próbki PEEK poddanej działaniu plazmy w atmosferze tlenu zmiana chropowatości wyrażonej w mikrometrach [μm] nie jest zauważalna.

Tabela 3

Parametr chropowatości powierzchni R_a badanych próbek PEEK oraz PU

Materiał/ modyfikacja		Parametr chropowatości R_a [μm]
PEEK	niemodyfikowany	$0,058 \pm 0,004$
	trawiony w Ar	$0,060 \pm 0,007$
	trawiony w N_2	$0,053 \pm 0,005$
	trawiony w O_2	$0,058 \pm 0,010$
PU	niemodyfikowany	$1,152 \pm 0,360$
	trawiony w Ar	$1,588 \pm 0,189$
	trawiony w N_2	$2,178 \pm 0,376$
	trawiony w O_2	$2,257 \pm 0,323$

Analizując wyniki chropowatości powierzchni, wyrażonej parametrem R_a , w przypadku próbek PU można zaobserwować, że przy zastosowaniu wszystkich atmosfery reakcyjnych parametr ten uległ znacznej zmianie. Największy wzrost tego parametru uzyskano w próbce trawionej jonowo w atmosferze tlenu. Wartość parametru R_a zwiększyła się z 1,152 μm do 2,257 μm . Proces trawienia jonowego w atmosferze tlenu spowodował zmianę charakterystyki powierzchni próbki PU.

4. Podsumowanie i wnioski

Tematyka dotycząca projektowania oraz zastosowania biomateriałów jest bardzo obszerną dziedziną wiedzy. Materiały, których przeznaczeniem jest kontakt z tkankami człowieka, muszą spełniać określone wymagania dotyczące m.in. biokompatybilności. Wymagania te weryfikowane są podczas długotrwałych badań oraz regulowane są szeregiem norm. W przypadku materiałów przeznaczonych do zastosowań implantacyjnych ich istotną cechą są właściwości powierzchni. Parametry opisujące powierzchnię materiałów, do których zalicza się m.in. kąt zwilżania, swobodną energię powierzchniową czy chropowatość, można kształtować, wykorzystując różne techniki obróbki.

Modyfikacja właściwości powierzchni materiałów jest procesem, którego wyniki zależą od wielu czynników. Otrzymane cechy powierzchni modyfikowanego materiału mogą zależeć m.in. od jego rodzaju, metody otrzymywania, a także procesu obróbki. Często złożoność czynników wpływających na kształtowanie właściwości powierzchni materiałów sprawia, że wyniki modyfikacji są trudne do przewidzenia.

Na podstawie przeprowadzonych badań można sformułować następujące wnioski:

- 1) W przypadku próbek PEEK wykonane modyfikacje w atmosferach argonu, azotu lub tlenu spowodowały zmniejszenie kąta zwilżania, wzrost swobodnej energii powierzchniowej (głównie składowej polarnej) oraz zmianę topografii powierzchni.
- 2) Zastosowanie tych samych warunków oraz atmosfery reakcyjnych dla drugiego materiału polimerowego PU spowodowało zmianę zwilżalności powierzchni w przypadku dwóch atmosfery reakcyjnych (atmosfery zawierającej azot oraz atmosfery argonu). Dla tych warunków procesu modyfikacji można zauważyć, że podobnie jak dla PEEK nastąpiło zmniejszenie kąta zwilżania, wzrost swobodnej energii powierzchniowej oraz zmiana topografii powierzchni.
- 3) Wykorzystanie tlenu do procesu modyfikacji nie spowodowało zmian wartości kąta zwilżania. Jednak wartość składowej polarnej energii powierzchniowej uległa blisko dwukrotnemu zmniejszeniu (tab. 1). W próbce PU modyfikowanej w atmosferze tlenu widoczne są również największe zmiany morfologii powierzchni. Modyfikacja plazmą niskotemperaturową w atmosferze argonu oraz azotu próbek wykonanych z poliuretanu pozwoliła na przekształcenie powierzchni hydrofobowej w hydrofilową.

- 4) Na podstawie pomiarów chropowatości powierzchni można zaobserwować, że sposób jej wstępnej obróbki wpływa na wartość parametru R_a . Próbki, których powierzchnie przed procesem modyfikacji poddano polerowaniu (próbki PEEK), charakteryzują się porównywalnymi wartościami chropowatości wyrażonej w mikrometrach mimo różnych atmosfer reakcyjnych. Natomiast w przypadku próbek poliuretanu, których powierzchnie nie były poddane obróbce wstępnej, można zaobserwować istotne zmiany w ich chropowatości.
- 5) Uzyskane zmiany w charakterystyce powierzchni badanych materiałów mogą być skutkiem procesów zachodzących podczas oddziaływania plazmy z powierzchnią materiałów polimerowych. Zmiana kąta zwilżania powierzchni poszczególnych próbek może wynikać z utworzenia się grup funkcyjnych odpowiedzialnych za właściwości hydrofobowe bądź hydrofilowe. Wykorzystana technika trawienia jonowego, ze względu na prostotę oraz brak konieczności zachowania wysokich temperatur, może być z powodzeniem stosowana w przypadku materiałów polimerowych, gdyż pozwala modelować wybrane parametry powierzchni materiałów.

Literatura

- Banoriya D., Purohit R., Dwivedi R.K., 2017, *Advanced Application of Polymer based Biomaterials*, Materials Today Proceedings, vol. 4, no. 2, s. 3534–3541, <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2017.02.244>.
- Błażewicz S., Marciniak J., 2016, *Biomateriały*, t. 4, Akademicka Oficyna Wydawnicza Exit, Warszawa.
- Bryjak M., Janecki T., Gancarz I., Smolińska K., 2009, *Plazmowa modyfikacja membran polimerowych*, [w:] Wódzki R. (red.), *Membrany teoria i praktyka. Wykłady monograficzne i specjalistyczne*, z. 3, Toruń, s. 64–79, <https://www.scribd.com/document/184313497/plazma>.
- Chen F., Gatea S., Ou H., Lu B., Long H., 2016, *Fracture characteristics of PEEK at various stress triaxialities*, Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials, vol. 64, s. 173–186, <https://doi.org/10.1016/j.jmbbm.2016.07.027>.
- Ferreira P., Alves P., Coimbra P., Gil M.H., 2015, *Improving polymeric surfaces for biomedical applications: a review*, Journal of Coating Technology and Research, vol. 12, no. 3, s. 463–475, <https://doi.org/10.1007/s11998-015-9658-3>.
- Florjańczyk Z., Penczek S., 1998, *Chemia polimerów*, t. 3, OWPW, Warszawa.
- Griffith L.G., 2000, *Polymeric biomaterials*, Acta Materialia, vol. 48, no.1, s. 263–277. https://doi.org/10.1007/978-0-387-84872-3_3.
- Kurtz S.M., 2012, *PEEK Biomaterials Handbook*, Wiliam Andrew Elsevier, Amsterdam.
- Lhotská I., Kholová A., Švec F., Šatínský D., 2024, *Nanofibers prepared from synthetic polymers and biopolymers as advanced extraction materials for sample preparation prior to liquid chromatography*, Trends in Analytical Chemistry, vol. 180, art. 117912, <https://doi.org/10.1016/j.trac.2024.117912>.

- Ma H., Suonan A., Zhou J., Yuan Q., Liu L., Zhao X., Lou X., Yang C., Li D., Zhang Y., 2021, *PEEK (Polyether-ether-ketone) and its composite materials in orthopedic implantation*, Arabian Journal of Chemistry, vol. 14, no. 3, art. 102977, <https://doi.org/10.1016/j.arabjc.2020.102977>.
- Ma R., Tang T., 2014, *Current Strategies to Improve the Bioactivity of PEEK*, International Journal of Molecular Sciences, vol. 15, no. 4, s. 5426–5445, <https://doi.org/10.3390/ijms15045426>.
- Panayotov I., Orti V., Cuisinier F., Yachouh J., 2016, *Polyetheretherketone (PEEK) for medical applications*, Journal of Materials Science. Materials in Medicine, vol. 27, no. 7, s. 118, <https://doi.org/10.1007/s10856-016-5731-4>.
- Ratner B.D., Castner D.G., 1997, *Surface modification of polymeric biomaterials*, Springer, New York.
- Shelke N.B., Nagarale R.K., Kumbar S.G., 2014, *Polyurethanes*, [w:] Kumbar S.G., Laurencin C.T., Deng M. (ed.), *Natural and Synthetic Biomedical Polymers*, Elsevier, San Diego, s. 123–144.
- Szlezýngier W., Brzozowski Z.K., 2012, *Tworzywa sztuczne: chemia, technologia wytwarzania, właściwości, przetwórstwo, zastosowanie*, t. 3: *Środki pomocnicze i specjalne zastosowanie polimerów*, Wydawnictwo Oświatowe FOSZE, Rzeszów.
- Szymaniak M., Budnicka M., Gadomska-Gajadur A.A., 2018, *Sposoby biomineralizacji polimerowych implantów kostnych*, Wydawnictwo Naukowe Tygiel, Lublin.
- Tyczkowski J., 1990, *Cienkie warstwy polimerów plazmowych*, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa.
- Varma K., Gopi S., 2020, *Biopolymers and their role in medicinal and pharmaceutical applications*, [w:] Thomas S., Gopi S., Amalraj A. (ed.), *Biopolymers and their Industrial Applications*, Elsevier, s. 175–191, <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-819240-5.00007-9>.
- Wendels S., Avérous L., 2021, *Biobased polyurethanes for biomedical applications*, Bioactive Materials, vol. 6, no. 4, s. 1083–1106, <https://doi.org/10.1016/j.bioactmat.2020.10.002>.
- Zhang S., Awaja F., James N., McKenzie D.R., Ruys A.J., 2011, *Autohesion of plasma treated semi-crystalline PEEK: Comparative study of argon, nitrogen and oxygen treatments*, Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, vol. 374, no. 1–3, s. 88–95, <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2010.11.013>.

Projekt innowacyjnego mechanizmu posuwisto-zwrotnego napędzającego żerdź przenośnika zabierakowego

Karolina Kopacz 

AGH Akademia Górniczo-Hutnicza, Wydział Inżynierii Mechanicznej i Robotyki, Kraków

Streszczenie: W artykule przedstawiono projekt mechanizmu posuwisto-zwrotnego napędzającego prototyp przenośnika regolitu księżycowego. Artykuł zawiera zarówno modele CAD tego mechanizmu, jak i jego późniejsze prototypy.

W podsumowaniu przedstawiono plany na przyszłość, gdzie zostanie zaprojektowane stanowisko badawcze, którego celem będzie zbadanie charakterystyki ruchu w celu optymalizacji parametrów mechanizmu. Wyniki tych badań mogą mieć istotne znaczenie dla efektywności i wydajności przenośnika zabierakowego.

Słowa kluczowe: mechanizm posuwisto-zwrotny, napęd przenośnika zabierakowego, modelowanie 3D, prototypowanie, badania ruchu

PROJECT OF AN INNOVATIVE RECIPROCATING-REVERSING MECHANISM DRIVING THE ROD OF TAKE-UP CONVEYOR

Abstract: The article presents a project of a reciprocating-reversing mechanism driving a prototype of a lunar regolith conveyor. The article includes both CAD models of this mechanism and its subsequent prototypes. In the summary, plans for the future are outlined, where a research facility will be designed with the aim of investigating the movement characteristics for optimizing the mechanism parameters. The results of these studies may have significant implications for the efficiency and performance of the rod scraper conveyor.

Keywords: reciprocating-reversing mechanism, rod scraper conveyor drive, 3D modeling, prototyping, motion analysis

https://doi.org/10.7494/978-83-68219-20-3_3

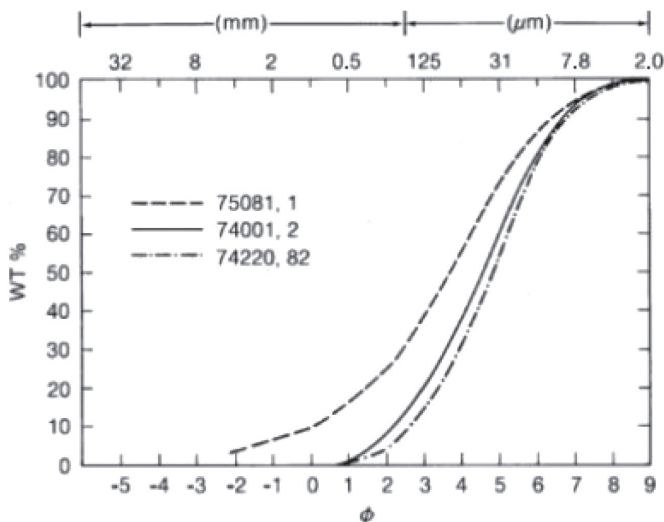
1. Wstęp

Obecnie branża kosmiczna dynamicznie się rozwija, otwierając przed nami możliwości, o których jeszcze niedawno mogliśmy tylko marzyć. Eksploracja Księżyca i potencjał wykorzystania jego zasobów w przyszłych misjach kosmicznych stanowią jeden z najbardziej fascynujących aspektów tego postępu. Wśród wielu wyzwań istotny jest problem transportu regolitu księżycowego, który może posłużyć jako cenny surowiec bazowy w kosmicznych przedsięwzięciach. Ponieważ nie istnieje urządzenie zdolne do efektywnego przenoszenia tego materiału, koło naukowe Universeh SpaceTeam AGH podjęło ambitne zadanie budowy prototypu transportera. Jednym z kluczowych aspektów tego projektu jest opracowanie mechanizmu posuwisto-zwrotnego, który umożliwi efektywny i precyzyjny transport regolitu w poziomie. W niniejszym artykule przedstawiono kontekst, cele oraz dotychczasowy postęp prac nad tym innowacyjnym rozwiązaniem, które może znacząco przyczynić się do dalszego rozwoju projektu, jakim jest transporter regolitu księżycowego.

Na powierzchni Księżyca panują surowe warunki, między innymi słaba grawitacja, sześciokrotnie mniejsza od ziemskiej, oraz brak atmosfery. Księżyc jest naturalnym satelitą Ziemi. Wykonuje on tzw. obrót synchroniczny. W ten sposób z Ziemi obserwujemy tylko jasną stronę księżycą. Z powodu braku atmosfery na powierzchni księżycą między jego oświetloną częścią a ciemną stroną występują ekstremalne wahania temperatury: od około 100°C w ciągu dnia do nawet -200°C w nocy (Żbik 2012). Występowanie tego zjawiska trzeba wziąć pod uwagę przy wyborze materiałów konstrukcyjnych transportera regolitu księżycowego. Brak atmosfery na Księżycu eliminuje siły oporu, które działałyby na transportowany materiał. Dodatkowo na powierzchni Księżyca po stronie słonecznej występuje emisja fotoelektryczna, natomiast po stronie nieoświetlonej wzrost potencjału elektrycznego powoduje wiatr słoneczny.

Powierzchnię Księżyca pokrywa gruba warstwa nieskonsolidowanego pyłu zwane go regolitem księżycowym (Taylor 2007). Jest on materiałem pylistym, który utrudnia działanie różnego rodzaju urządzeń. Regolit księżycowy nie ma swojego odpowiednika na powierzchni Ziemi. Jest to drobnodziarnista szara gleba o gęstości około $1,5\text{ g/cm}^3$, składająca się głównie z pyłu, fragmentów minerałów oraz fragmentów skał krystalicznych. Grubość warstwy glebowej księżycą wynosi od 5 m do 10 m pyłu księżycowego (Meyer 2003). Regolit w głównej mierze składa się z cząsteczek mniejszych niż 60–80 μm . Dokładny rozkład wielkości jego ziaren przedstawia rysunek 1.

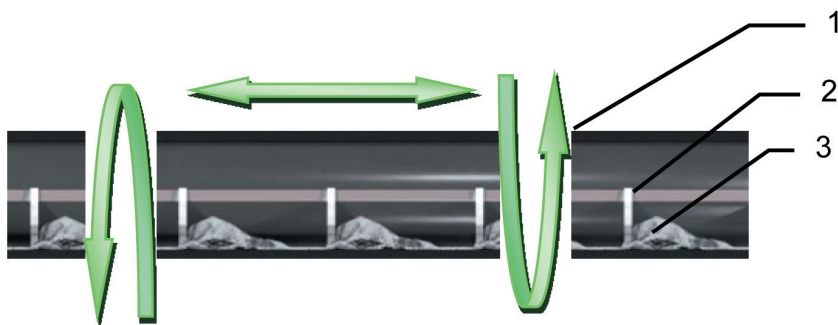
Astronauci misji Apollo 11 donoszą, że konsystencją przypomina on mokry piasek oraz wykazuje słabą płynność. Jest to materiał wysoce abrazyjny (zatem bez trudu może porysować twardą powierzchnię), adhezyjny (przylega oraz przykleja się do na przykład skafandrów, ciężko jest się go pozbyć) oraz kohezyjny (cząsteczki silnie do siebie przylegają) (Yu Huang i Hu-Zheng 2014).



Rys. 1. Rozkład wielkości ziaren regolitu (linia 75081) [3]

2. Zasada działania prototypu przenośnika regolitu księżycowego

Poziomy transport regolitu księżycowego może odbywać się w rurze, co zostało przedstawione na rysunku 2. Zielone strzałki (1) wskazują na kierunki ruchu obrotowego oraz postępowego. W środku znajduje się żerdź (2) z zamontowanymi do niej zgrzeblami w odpowiedniej odległości od siebie, tak aby regolit był transportowany porcjami. Zgrzebła mają kształt połowy koła i po przeniesieniu porcji regolitu (3) do przodu obracają się o 180° i wracają do pozycji początkowej, następnie znowu się obracają, umożliwiając transport następnej porcji regolitu do przodu.



Rys. 2. Schemat działania ruchu mechanizmu wewnątrz rury – pionowy przekrój wnętrza rury

Opisany powyżej ruch realizowany jest przez mechanizm napędowy o charakterze posuwisto-zwrotnym. Kluczowym aspektem w projekcie przenośnika jest jego modułowość

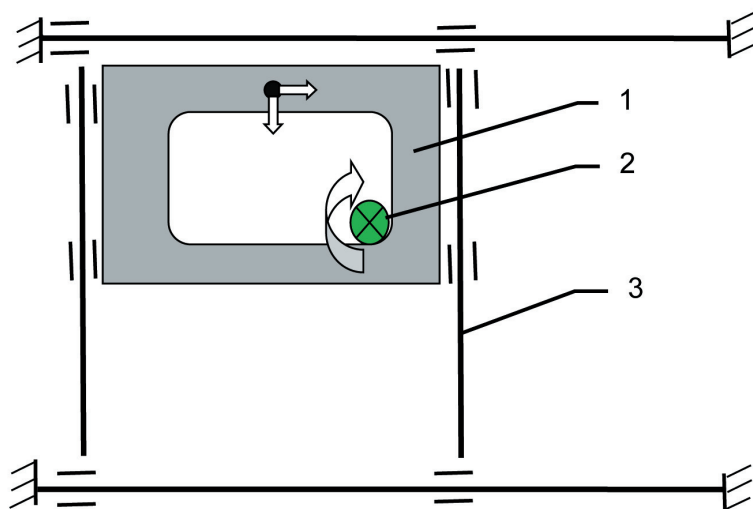
i zastosowanie jak najmniejszej liczby części w celu zminimalizowania jego całkowitej wagi, co ułatwi jego umieszczenie w docelowym środowisku księżycowym. Z tego powodu zdecydowano się na jeden mechanizm, który łączy zarówno ruch posuwisty, jak i zwrotny.

3. Mechanizm napędowy o charakterze posuwisto-zwrotnym

Obecny mechanizm posuwisto-zwrotny wykorzystywany w prototypie transportera regolitu księżycowego wykazuje pewne niedoskonałości. Jedną z nich jest zbyt duże zużycie energii oraz jego zmienna charakterystyka kinematyczna. Badania nad mechanizmem pozwoliły zauważyć aspekty, które można udoskonalić, zwiększając tym samym jego wydajność oraz optymalizując zużycie mocy. Głównym założeniem nowej koncepcji mechanizmu było ustabilizowanie jego charakterystyki kinematycznej.

3.1. Mechanizm – koncepcja pierwsza

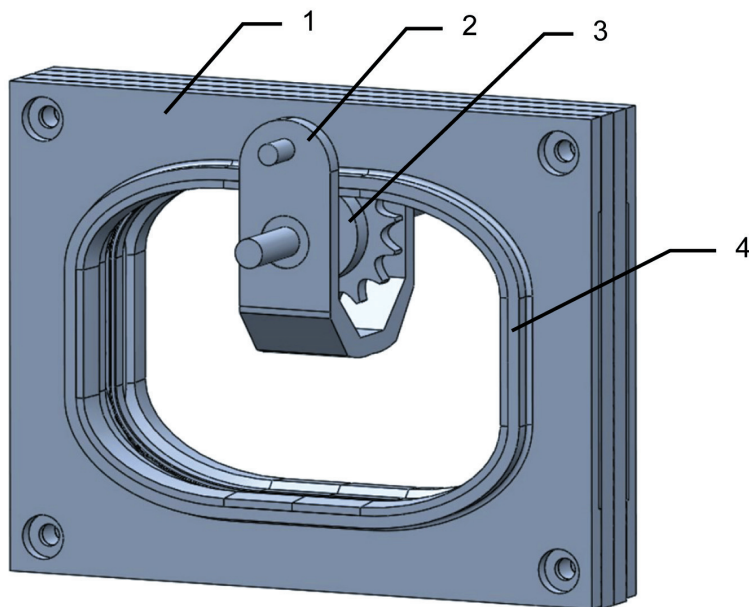
Pierwszy projekt nowego mechanizmu zakładał konstrukcję ramki z wbudowanym łańcuchem. Ruch posuwisto-zwrotny realizowany jest poprzez pionowe i poziome przesunięcia ramki, napędzanej przez koło zębate zamocowane na nieruchomym uchwycie, poruszające się po wewnętrznym łańcuchu (rys. 3).



Rys. 3. Schemat przemieszczania się ramki napędowej

Kiedy ruchoma ramka (1) przemieszcza się w poziomie, wykonywany jest ruch posuwisty żerdzi. Natomiast kiedy koło zębate znajdujące się w nieruchomym uchwycie (2)

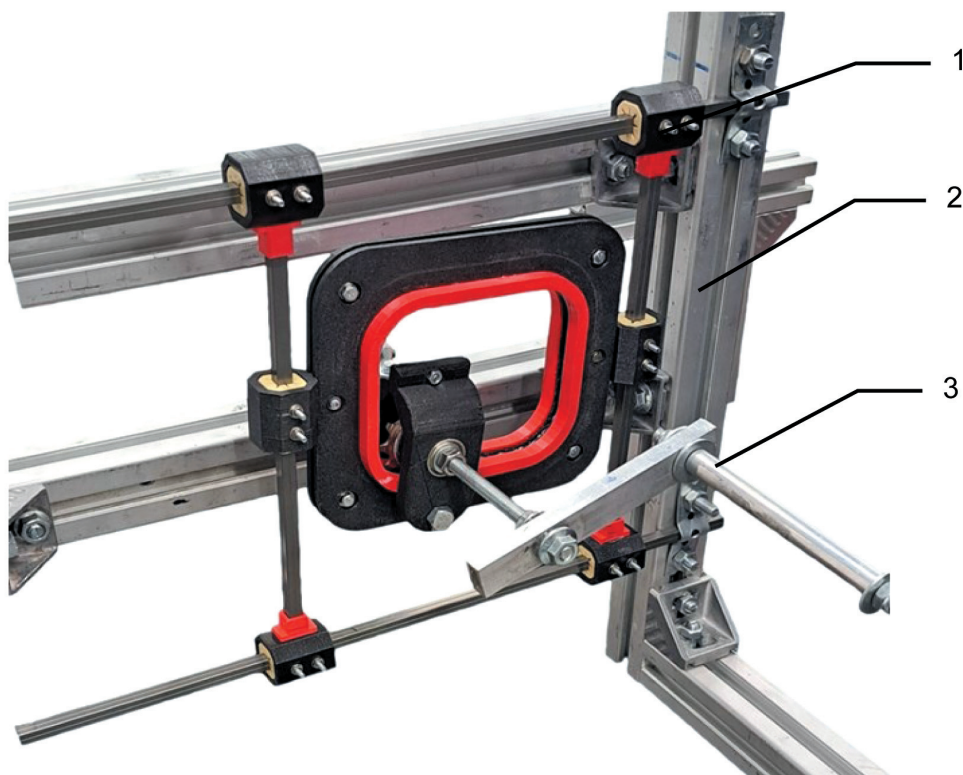
porusza się w pionie, ramka przemieszcza się pionowo, realizowany jest tym samym ruch obrotowy żerdzi. Całość ramki porusza się na prowadnicach (3). Złożenia modeli CAD przedstawione zostały na rysunku 4. Ramka składa się z części zewnętrznych (1) z prowadnicami (4) oraz części wewnętrznych z zaprojektowanym wcięciem pod łańcuch rowerowy. Drugim elementem współtworzącym całość jest wózek (2) z napędowym kołem zębatym (3). Górna część wózka porusza się po prowadnicach ramki za pomocą łożysk, spełniając w ten sposób rolę dociskową do łańcucha dla koła zębatego.



Rys. 4. Złożenia modeli CAD mechanizmu zaprojektowanego w oprogramowaniu Solidworks

Ruch posuwisto-zwrotny odbywa się przez przemieszczenia ramki. Kiedy ramka porusza się w poziomie, realizowany jest ruch posuwisty żerdzi. Natomiast kiedy koło zębate znajduje się w pionie, ramka wykonuje ruch pionowy. Pionowy ruch ramki umożliwia obrót żerdzi. Kiedy ramka przemieszcza się w poziomie, to żerdź wykonuje ruch posuwisty.

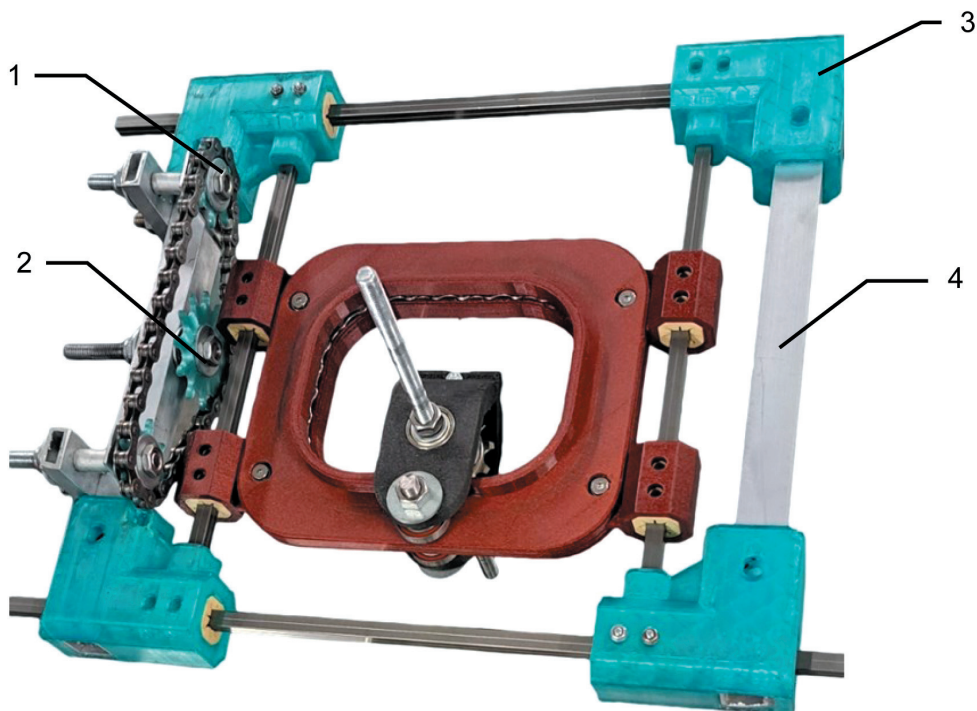
Na podstawie tej koncepcji zostały wytworzone prototypy za pomocą szybkiego prototypowania i druku 3D. Prototyp A został przedstawiony na rysunku 5. Cała konstrukcja stanowiska badawczego prototypu mechanizmu opierała się na ramie skonstruowanej z profili aluminiowych (2). Prototyp ramki został zamontowany do łożysk ślizgowych, dla których zostały zaprojektowane specjalne obudowy (1) umożliwiające połączenie łożysk z ramką oraz prowadnicami, po których mogły się poruszać. Prototyp jest wprowadzany w ruch za pomocą korbki (3).



Rys. 5. Zdjęcie prototypu A mechanizmu posuwisto-zwrotnego

Pierwszym problemem, który pojawił się podczas badań prototypu A, była jego zbyt mała sztywność. Z tego powodu podczas ruchu ramki występowały znaczne momenty obrotowe, zaburzające liniową pracę łożysk ślizgowych. Zaowocowało to ogólnym wzmocnieniem sztywności całego mechanizmu w jego kolejnej iteracji, którą przedstawia rysunek 6. Zostały zaprojektowane większe obudowy na łożyska ślizgowe (3) oraz zamontowane dodatkowe profile prostokątne w pionie (4) służące do zniwelowania momentów obrotowych. Zainstalowano też system obrotu żerdzi składający się z trzech kół zębatach oraz cięgna łańcuchowego (1). Łańcuch został połączony na stałe z ramką, a środkowe koło zębate przechodzące przez profil aluminiowy zamontowano do pręta imitującego żerdź (2). Podczas przesuwania się ramki w pionie środkowe koło zębate jest wprawiane w ruch za pomocą łańcucha i obraca się o 180° , dokładnie imitując ruch obrotowy żerdzi.

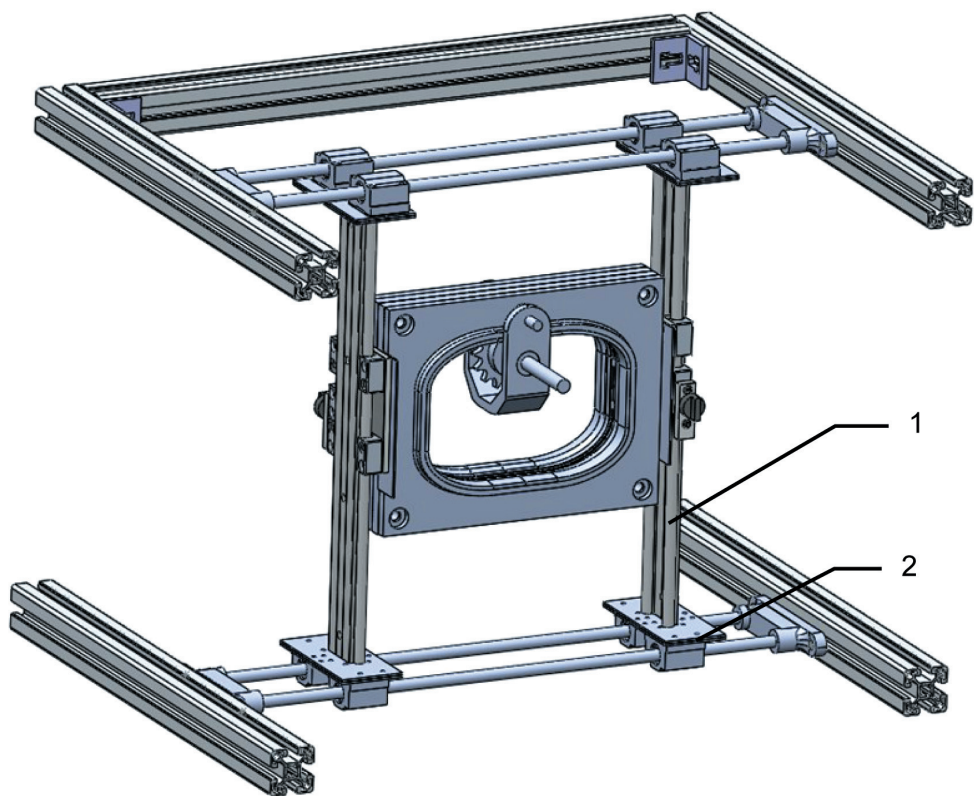
Prototyp B został poprawnie wykonany, a wstępne testy pozwoliły na sformułowanie następujących wniosków. Przede wszystkim zastosowanie większych, mocniejszych łożysk i prowadnic ślizgowych pozwoli zachować jeszcze lepszą sztywność, a co za tym idzie – pomoże zniwelować skutki momentów obrotowych.



Rys. 6. Zdjęcie prototypu B mechanizmu posuwisto-zwrotnego

Model wzmocnionego mechanizmu ramki został przedstawiony na rysunku 7. Konstrukcja ramki została osadzona na profilach aluminiowych, w celu wzmocnienia w pionie zamontowano szyny ślizgowe (1), a do nich specjalne łożyska. Ten model łożysk ślizgowych charakteryzował się dużo większą sztywnością niż poprzednie rozwiązania. W poziomie zastosowano podwójne profile ślizgowe oraz pary łożysk (2).

Kluczową kwestią dla całego ruchu posuwisto-zwrotnego okazał się kształt ramki. Największy wpływ na działanie ramki mają jej promienie wewnętrzne oraz długość w poziomie i w pionie. Zmiana promienia wewnętrznego ramki modyfikuje charakterystykę przejścia ruchu posuwistego na ruch obrotowy, a pozioma długość ramki jest tożsama z odlegością przesuwu zgrzebeł. Ze względu na obecność mechanizmu posuwisto-zwrotnego od początku w projekcie przenośnika regolitu księżycowego nie jest znana najbardziej efektywna charakterystyka poszczególnych ruchów. Dlatego postanowiono stworzyć drugą koncepcję i rozdzielić ruch posuwisty i zwrotny na dwa osobne ruchy. Następnie przeprowadzone zostaną badania, aby znaleźć najbardziej optymalną charakterystykę pracy tego przenośnika, co pozwoli później przenieść wyniki na pierwotną wersję mechanizmu.

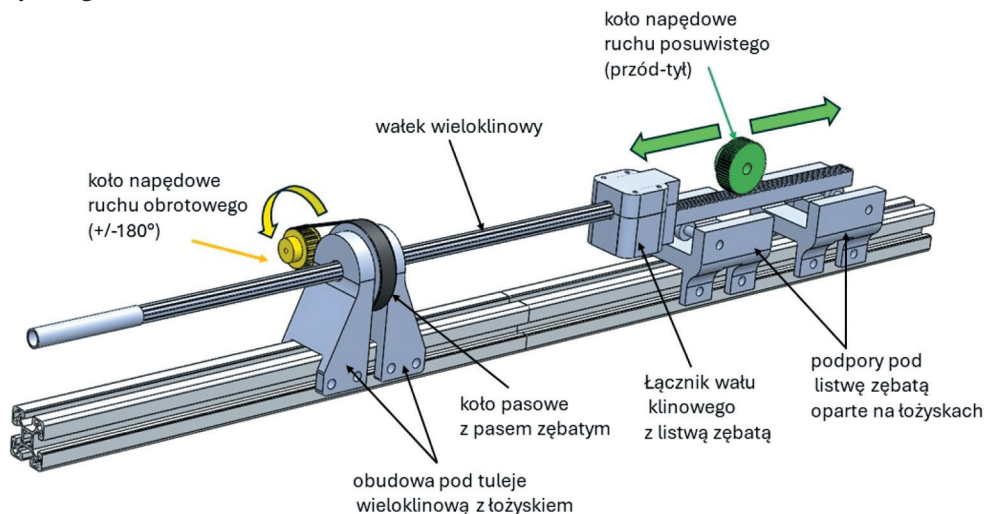


Rys. 7. Model złożenia CAD wzmocnionej koncepcji mechanizmu posuwisto-zwrotnego zaprojektowany w oprogramowaniu Solidworks

3.2. Mechanizm – koncepcja druga

Przedstawiona na rysunku 8 wersja mechanizmu przenośnika regolitu księżycowego składa się z dwóch napędów – posuwistego oraz zwrotnego. Żerdź jest połączona z wałem wieloklinowym, który za pomocą zaprojektowanego łącznika jest zespolony z listwą zębatą. Ruch posuwisty odbywa się podczas napędu koła zębatego na listwie zębatej, która podparta jest na łożyskach zamontowanych na specjalnie zaprojektowanych podporach, umożliwiających swobodne przemieszczanie się przód–tył. Natomiast ruch obrotowy realizowany jest przez wałek wieloklinowy, na który nałożony jest pierścień wieloklinowy z przymocowanym kołem pasowym. Całość podtrzymuje specjalnie zaprojektowana podpora. Za pomocą paska zębatego ruch obrotowy z koła napędowego jest przeniesiony na całą konstrukcję z wałkiem klinowym.

Odpowiednia synchronizacja obu napędów pozwoli na przeprowadzenie badań dotyczących najbardziej optymalnej charakterystyki ruchu pracy żerdzi z zamontowanymi zgrzeblami.



Rys. 8. Model złożenia CAD mechanizmu dwusilnikowego zaprojektowanego w oprogramowaniu Solidworks

4. Podsumowanie

Koncepcja mechanizmu realizującego ruch posuwisty oraz zwrotny jest nadal rozwijana. Aktualnie prototyp tego mechanizmu nie jest ostatecznie skończony. Jednak zaplanowano już kolejne kroki jego udoskonalania, na przykład badania oporów ruchu w trakcie pracy żerdzi w rurze. Zmienne, które będą sprawdzane podczas badań, to przede wszystkim charakterystyka ruchu, ale również rozstaw zgrzebeł, szybkość pracy czy zastosowanie różnych wykładzin w rurze. Po przeprowadzeniu tych badań i ustaleniu zmiennych, które pozwolą na najbardziej efektywną pracę przenośnika, rozwiązania zostaną zastosowane w koncepcji pierwszej. Po określeniu optymalnej charakterystyki pracy będzie możliwość zaprojektowania odpowiedniego kształtu ramki innowacyjnego mechanizmu posuwisto-zwrotnego.

Literatura

Meyer C., 2003, *Lunar Regolith*, [w:] Meyer C. *NASA Lunar Petrographic Educational Thin Section Set*, s. 46–48, https://www-curator.jsc.nasa.gov/Education/LPETSS/documents/CMEYER_booklet2003.pdf [dostęp: 31.10.2025].

- Taylor S.R., 2007, *The Moon*, [w:] Johnson T.V. (eds.), *Encyclopedia of the Solar System*, 2 ed, Elsevier, Amsterdam, s. 227–251.
- Yu Huang, Hu Zheng, 2014, *Mechanical characteristics of a lunar regolith simulant at low confining pressure*, *Environmental Earth Sciences*, vol. 71, no. 8, s. 3697–3703, <http://doi.org/10.1007/s12665-013-2763-7>.
- Żbik M.S., 2012, *Pył księżycowy i jego dziwne własności*, *Wszechświat*, t. 113, nr 1–3, s. 31–35.

Stanowisko badawcze do demonstracji działania dźwiękochłonnych metamateriałów akustycznych w falowodach o przekroju okrągłym

Piotr Książek 

AGH Akademia Górniczo-Hutnicza, Wydział Inżynierii Mechanicznej i Robotyki, Kraków

Streszczenie: Niniejszy tekst dotyczy konstrukcji zestawu popularyzatorskiego demonstrującego zastosowania tłumików wykorzystujących rezonans akustyczny w kontekście tłumienia hałasu przemysłowego o charakterze wąskopasmowym. Zestaw składa się z dwóch głównych komponentów: falowodu o przekroju okrągłym oraz wymiennych elementów tłumika umieszczanych w kanale falowodu. Demonstracja funkcjonalności tłumików odbywa się przy użyciu opracowanej aplikacji, która porównuje widmo akustyczne sygnału zarejestrowanego na wylocie falowodu bez zamontowanych tłumików oraz z zamontowanymi tłumikami. Przedstawiono kolejne etapy konstrukcji zestawu demonstracyjnego, proces optymalizacji geometrii tłumików rezonatorowych oraz trudności w zastosowaniu druku 3D w procesach produkcyjnych metamateriałów akustycznych. Omówiono możliwości zastosowania zestawu demonstracyjnego w kontekście dydaktycznym, popularyzacji nauki oraz walki z hałasem. Poruszono także kwestię szerokich możliwości dalszego rozwoju konstrukcji, w szczególności potencjału zastosowania w prototypowaniu nowych geometrii metamateriałów akustycznych.

Słowa kluczowe: falowód, optymalizacja, popularyzacja nauki, rezonans akustyczny

RESEARCH STATION FOR DEMONSTRATING THE PERFORMANCE OF SOUND ABSORBING ACOUSTIC METAMATERIALS IN CIRCULAR WAVEGUIDES

Abstract: This paper is concerned with the construction of a demonstration kit to illustrate the applications of acoustic resonance-based suppressors in the context of narrowband industrial noise suppression. The kit consists of two main components – a circular waveguide and interchangeable silencer elements inserted into the waveguide channel. The functionality of the attenuators is demonstrated using an application that compares the acoustic spectrum of the signal recorded at the outlet of the waveguide without the attenuators installed and with the attenuators in place. Construction steps of the demonstration kit are presented as well as the process of optimising the geometry of the resonator dampers and the difficulties of using 3D printing in the manufacturing processes of acoustic metamaterials are presented. The possibilities of using the demonstration set in the context of teaching, science communication and tackling acoustic noise pollution were also discussed. The broad possibilities for further development of the design, particularly the potential for use in prototyping new geometries of acoustic metamaterials were also addressed.

Keywords: waveguide, optimization, science communication, acoustic resonance

https://doi.org/10.7494/978-83-68219-20-3_4

1. Wstęp

Rezonans akustyczny jest szeroko wykorzystaną metodą pochłaniania dźwięku w zadanych wąskich pasmach częstotliwości. Projektowane są zarówno rezonatory dostrojone do jednej częstotliwości (Chojnacki i in. 2024, Prasetyo i in. 2019) jak i rezonatory wspierające funkcjonowanie paneli akustycznych stosowanych w adaptacji pomieszczeń (Chojnacki i in. 2023). Tego typu struktury rezonansowe wymagają przeprowadzenia złożonego procesu modelowania oraz prototypowania. W najnowszych badaniach w zakresie materiałów akustycznych szczególną popularnością cieszą się tzw. metamateriały – złożone struktury projektowane pod kątem spełnienia konkretnej funkcjonalności (Yang i Sheng 2017, Jiménez i in. 2021). Jednym ze sposobów projektowania metamateriałów jest łączenie struktur rezonansowych o różnych częstotliwościach pracy (Jiménez i in. 2017, Langfeldt i in. 2020). Stosowane są także rezonatory oparte na strukturach mikroperforowanych (Zhang i Cheng 2019). Ze względu na dynamiczny rozwój tej dziedziny pojawiają się dodatkowe potrzeby związane z popularyzowaniem tego typu zagadnień wśród szerszego grona odbiorców.

Można przedstawić działanie metamateriałów akustycznych z wykorzystaniem falowodu o przekroju okrągłym. Przykładem takiego falowodu jest rura impedancyjna służąca do pomiarów charakterystyki zarówno pochłaniania dźwięku (Polski Komitet Normalizacyjny 2024), jak i straty przejścia dźwięku przez warstwę materiału lub ustrój (Chojnacki i in. 2022). Pomiary te pozwalają na uzyskanie dokładnych wyników w pomiarach metamateriałów (Chojak i in. 2023), jednak ich przeprowadzenie wymaga specjalistycznego sprzętu oraz umiejętności.

W artykule opisano proces budowy zestawu badawczego pozwalającego na wyznaczenie parametrów struktur rezonansowych oraz demonstracji działania tych struktur. Popularyzacja nauki z wykorzystaniem zestawów demonstracyjnych jest istotnym elementem procesu dydaktycznego, dostarczenie nowych materiałów na ten cel jest więc jednym z kluczowych zagadnień inżynierii akustycznej. Założeniami projektu było utrzymanie niskiego kosztu wykonania oraz łatwość użytkowania, co pozwoliłoby na popularyzację metamateriałów akustycznych oraz walki z hałasem. Celem było zaprezentowanie metod redukcji hałasów harmonicznym i szerokopasmowym za pomocą struktur metamateriałowych. W niniejszej pracy opisano motywację do podjęcia tematu, proces projektowania, wymagane symulacje akustyczne, a także etapy budowy stanowiska, jego walidację i pierwsze demonstracje.

2. Przygotowanie projektu zestawu demonstracyjnego

Proces przygotowawczy składał się z trzech etapów. Na początku opracowano projekt zestawu zapewniający podstawowe funkcjonalności. Następnie dokonano optymalizacji rezonatora Helmholtza stanowiącego element główny demonstracji. Na końcu skonstruowano zestaw demonstracyjny i przeprowadzono jego walidację.

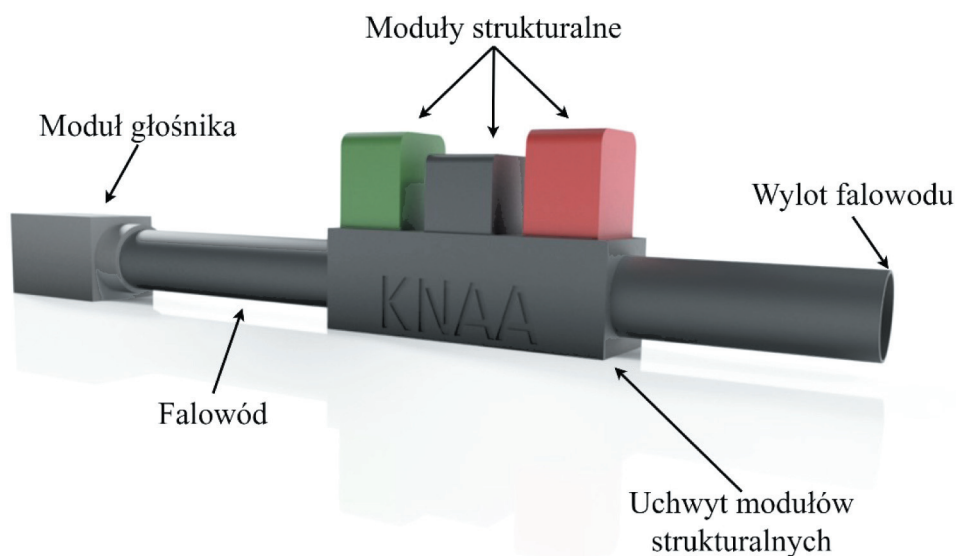
2.1. Opracowanie projektu podstawowego

Pierwszym krokiem był wybór metody demonstracji strat termowiskotycznych oraz opracowanie podstawowej konstrukcji zestawu demonstracyjnego. Uznano, że odpowiednią metodą demonstracji działania rezonansowych tłumików akustycznych będzie wykorzystanie falowodu o przekroju okrągłym z zamiennymi elementami ściany bocznej. Taka konstrukcja umożliwia wprowadzenie do falowodu dowolnej struktury pod warunkiem zachowania ciągłości jego ścian wewnętrznych.

Elementem głównym zestawu jest falowód o przekroju okrągłym. Nominalna średnica wewnętrzna falowodu wynosi 48 mm, a grubość ścianki – 2 mm. W falowodzie zaprojektowano trzy otwory, które pozwalają na montaż struktur rezonansowych i referencyjnych w taki sposób, aby możliwe było zachowanie ciągłości ściany falowodu oraz szczelności zestawu demonstracyjnego.

Falowód jest umieszczony na stałe w uchwycie modułów strukturalnych, składającym się z dwóch części. Części składowe uchwytu stanowią równocześnie pokrywę i podstawę zestawu demonstracyjnego. Oba elementy są związane na stałe ze sobą oraz z właściwym falowodem. Uchwyt zaprojektowany jest w taki sposób, aby zapewnić możliwość szczelnego umieszczania modułów strukturalnych na szczycie rury.

Na jednym z końców falowodu znajduje się moduł wzбудnika akustycznego. Jest to bezpośrednio połączona z falowodem obudowa z zamontowanym głośnikiem o średnicy 44 mm, którego zadaniem jest emisja energii akustycznej w trakcie demonstracji. Wewnątrz obudowy znajduje się także zintegrowany wzmacniacz oraz porty przyłączeniowe sygnału i zasilania. Kompletny koncepcyjny model zestawu demonstracyjnego przedstawiono na rysunku 1.



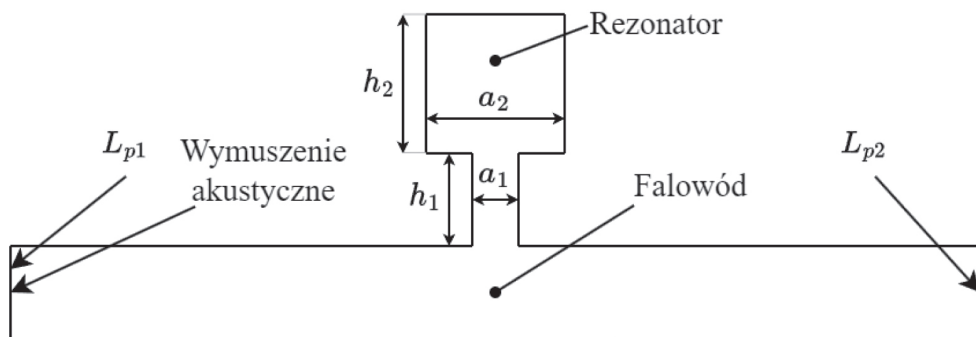
Rys. 1. Elementy zestawu demonstracyjnego – model koncepcyjny

Elementami wymiennymi zestawu demonstracyjnego są moduły strukturalne, które dzielą się na dwa rodzaje. Pierwszym z nich są moduły referencyjne, które zostały zaprojektowane w taki sposób, aby po umieszczeniu ich w uchwycie wewnętrzna ścianka falowodu zachowywała ciągłość. Drugim typem modułu strukturalnego wykorzystanym w projekcie jest moduł rezonansowy. Jest to element, który oprócz ogólnego zachowania ciągłości ściany falowodu zawiera także umieszczoną we wnętrzu strukturę rezonatora Helmholtza o wybranej częstotliwości rezonansu.

2.2. Optymalizacja struktury akustycznej

Do osiągnięcia satysfakcjonujących rezultatów tłumienia dźwięku przez moduły rezonansowe konieczne było zaprojektowanie geometrii wewnętrznej rezonatora Helmholtza znajdującego się w module. W tym celu zastosowano modelowanie przy wykorzystaniu metody elementów skończonych (MES) oraz przeprowadzono proces optymalizacji.

Przygotowano model numeryczny objętości powietrza znajdującego się w pojedynczej strukturze rezonansowej, połączonej z prostym odcinkiem falowodu o przekroju okrągłym. Zdefiniowano założenia dotyczące powierzchni wlotu oraz wylotu geometrii modelu. Następnie na stronie wlotu modelu wprowadzono warunek brzegowy wymuszenia falą płaską. Geometrię modelu przedstawiono na rysunku 2.



Rys. 2. Model numeryczny wykorzystany w procesie optymalizacji

Maksymalną częstotliwość analizy ustalono na 1000 Hz. Zdefiniowano siatkę modelu numerycznego zbudowaną z elementów czworosiennych o maksymalnej wielkości elementu określonej równaniem (1). W bezpośrednim sąsiedztwie szyjki rezonatora Helmholtza zwiększono zagęszczenie siatki ośmiokrotnie w celu uzyskania lepszej reprezentacji występujących w szyjce zjawisk termowiskotycznych.

$$h_{\max} = \frac{c}{6f_{\max}} \quad (1)$$

Parametrem wyjściowym modelu była strata przejścia poziomu ciśnienia akustycznego zdefiniowana równaniem (2), gdzie L_{p1} [dB] oznacza uśredniony poziom ciśnienia akustycznego na powierzchni wlotu modelu, a L_{p2} [dB] oznacza uśredniony poziom ciśnienia akustycznego na powierzchni wylotu.

$$STL = L_{p1} - L_{p2} \quad (2)$$

Przeprowadzono optymalizację przy użyciu metody PSO (*particle swarm optimization*) (Bonyadi i Michalewicz 2017). Wyznaczono cztery parametry optymalizacji będące wymiarami geometrycznymi struktury rezonatora. Określono funkcję celu optymalizacji będącą odwrotnością wartości straty przejścia dla wybranej częstotliwości obliczanej przez model. Częstotliwością wybraną dla optymalizacji było 440 Hz. Optymalizacja została przeprowadzona w 10 iteracjach i dotyczyła populacji liczącej 12 elementów. Wymiary optymalnego rozwiązania przedstawiono w tabeli 1.

Tabela 1

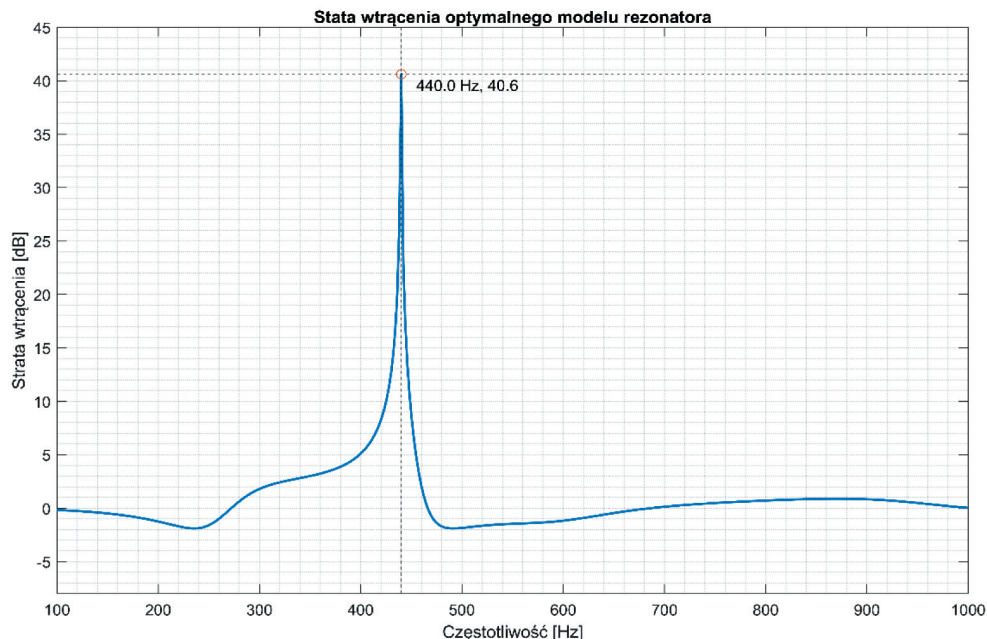
Wyznaczone optymalne parametry geometryczne struktury rezonansowej

Parametr	Wymiar [mm]
h_1	7,79
h_2	50
a_1	7,265
a_2	34,25

W kolejnych etapach projektu operowano parametrem straty wtrącenia struktury rezonansowej określonym równaniem (3), gdzie L_{p0} oznacza poziom ciśnienia akustycznego występujący na wylocie falowodu bez zamontowanej struktury rezonansowej (pełna ciągłość ścian falowodu), natomiast $L_{p_{struk}}$ – poziom ciśnienia akustycznego występujący na wylocie falowodu z zamontowaną strukturą rezonansową. Parametr testowy został zmodyfikowany w celu uproszczenia pomiaru straty wtrącenia w falowodzie z otwartym końcem względem straty przejścia.

$$IL = L_{p0} - L_{p_{struk}} \quad (3)$$

Obliczono stratę wtrącenia w szerokim zakresie częstotliwości dla wyznaczonej optymalnej geometrii przedstawionej na rysunku 3. Wartość maksymalna straty przejścia wyniosła 40,6 dB. Zauważono również, że rezonans zawarty w funkcji straty wtrącenia optymalnej geometrii wykazuje wysoką dobroć. Weryfikacja modelu pozwala na przejście do etapu konstrukcji zestawu demonstracyjnego.



Rys. 3. Wyniki straty wtrącenia optymalnej struktury rezonansowej

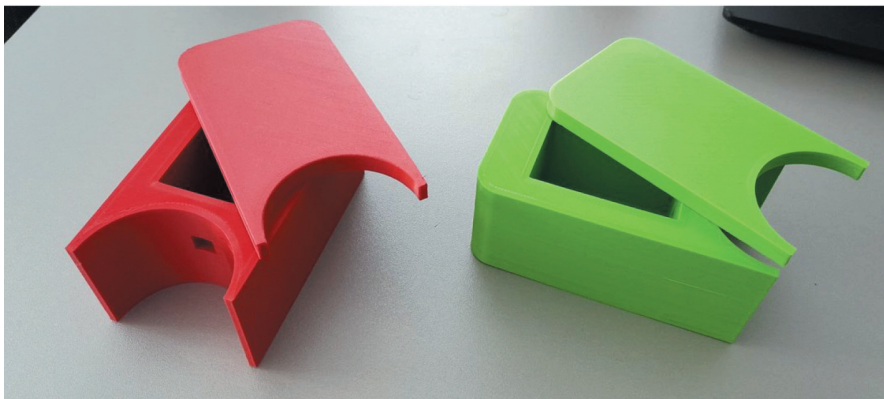
2.3. Konstrukcja zestawu demonstracyjnego

Ostatnim etapem przygotowania podstawowego zestawu demonstracyjnego było wykonanie wszystkich zaprojektowanych elementów. Aby osiągnąć satysfakcjonujący i szybki rezultat przy jednoczesnym zachowaniu dokładności wykonania, wykorzystano druk 3D do przygotowania części elementów zestawu. Wytwarzanie przyrostowe zostało wielokrotnie walidowane jako odpowiednia metoda do zastosowań w prototypowaniu struktur akustycznych (Chojnacki i in. 2021a, b). Właściwy falowód został wykonany ze zmodyfikowanej rury PVC zgodnie z uprzednio przygotowaną dokumentacją techniczną.

Wydruk 3D struktury rezonansowej wymaga dostosowania techniki druku w celu zachowania szczelności drukowanej struktury oraz wymiarów geometrii (Ciochon i in. 2023). Struktury rezonansowe zestawu demonstracyjnego wydrukowano z zastosowaniem zwiększonej grubości warstwy ścian, podłoży oraz sklepień wydruku. Na rysunku 4 przedstawiono moduły strukturalne, wydrukowane w dwóch elementach, ponieważ druk zwisających sklepień wymagałby wykorzystania struktur wspornikowych, których demontaż nie byłby możliwy ze względu na rozmiar otworu rezonatora. Ostatecznie wydrukowano dwie struktury rezonansowe w dwóch różnych kolorach.

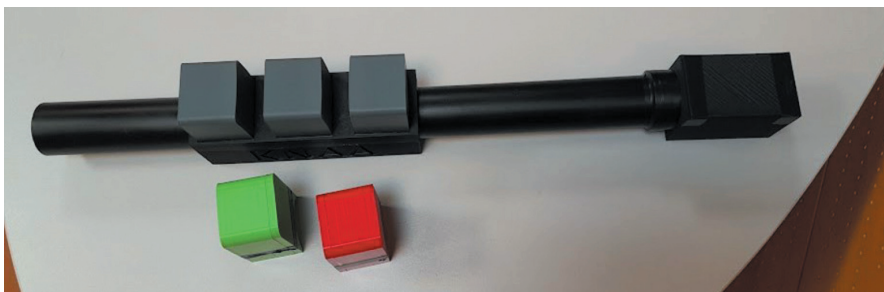
W celu zapewnienia funkcjonalności zestawu zakupiono głośnik Visaton FRWS 4 ND w wariantcie o impedancji 8Ω oraz wzmacniacz dźwięku TEA2025B o nominalnej mocy wyjściowej 3 W oraz napięciu zasilania wynoszącym 5 V. Zakupiono także ele-

menty potrzebne do przygotowania złącz zestawu – złącze typu TRS oraz generyczne złącze zasilania DC.



Rys. 4. Wydrukowana geometria modułów ze strukturą rezonansową

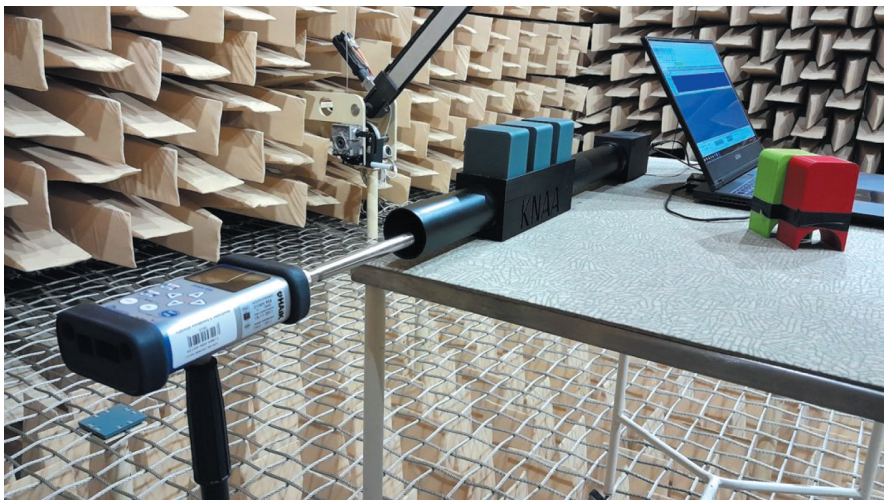
Zmontowano i przetestowano zestaw głośnikowy. Następnie spoiną epoksydową połączono oba elementy uchwyty modułów strukturalnych z falowodem. Zweryfikowano jakość pasowania między modułami strukturalnymi oraz uchwytem. Zdecydowano się na zastosowanie pojedynczej warstwy taśmy izolacyjnej w roli warstwy uszczelniającej montaż struktur. Gotową konstrukcję zestawu demonstracyjnego przedstawiono na rysunku 5.



Rys. 5. Gotowa konstrukcja zestawu demonstracyjnego

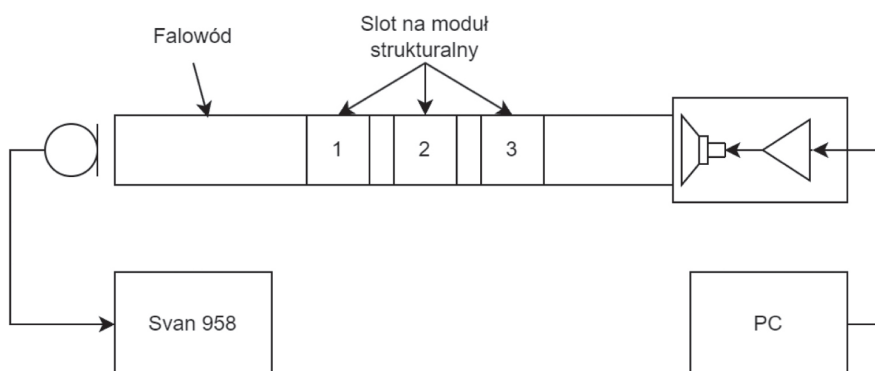
3. Weryfikacja pomiarowa działania zestawu demonstracyjnego

Działanie skonstruowanego zestawu demonstracyjnego zostało zweryfikowane podczas sesji pomiarowej przeprowadzonej w komorze bezchłowej AGH. Do pomiarów wykorzystano miernik SVANTEK SVAN 958 oraz komputer wyposażony w kartę dźwiękową. Fotografię toru pomiarowego przedstawiono na rysunku 6.



Rys. 6. Fotografia zestawu pomiarowego wykorzystanego w trakcie weryfikacji

W celu systematyzacji pomiarów weryfikacyjnych wprowadzono znaczniki struktur rezonansowych oraz referencyjnych. Struktury referencyjne oznaczono literą X, natomiast struktury rezonansowe – literami A oraz B. Kolejne otwory w strukturze rezonansowej oznaczono w kolejności dystansu od wylotu falowodu. Oznaczenie XXX symbolizuje przypadek referencyjny (wszystkie zamontowane struktury są strukturami referencyjnymi), natomiast AXB oznacza montaż dwóch struktur rezonansowych na skrajnych krawędziach zestawu demonstracyjnego z pojedynczą strukturą referencyjną między nimi. Schemat toru pomiarowego wraz z oznaczeniem kolejnych slotów w zestawie przedstawiono na rysunku 7.



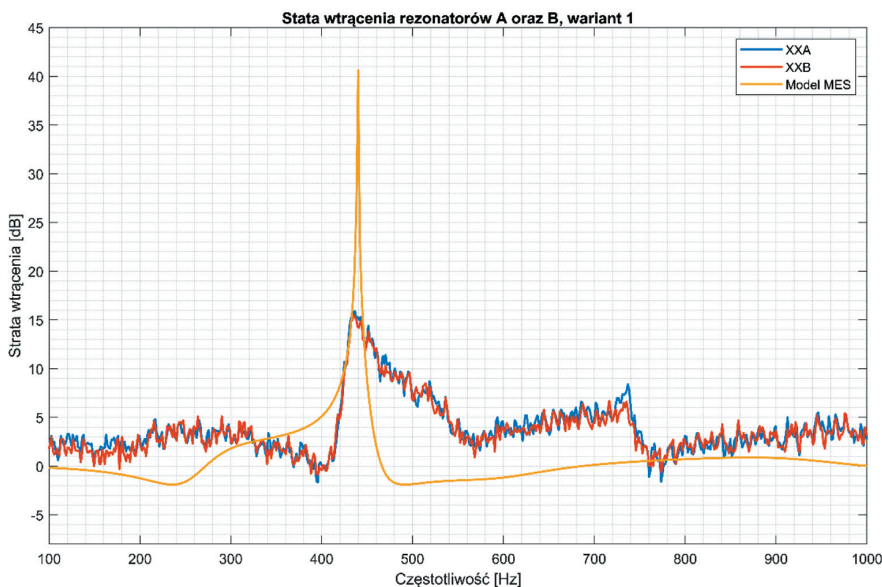
Rys. 7. Diagram toru pomiarowego wykorzystanego w trakcie weryfikacji

Sygnałem wykorzystanym do wzbudzenia falowodu był szum biały, filtrowany górno-przepustowo z częstotliwością odcięcia 100 Hz. Przetestowano zestawienia prze-

strzenne XXA, XXB, AXX, BXX, AXB, BXA. Przed pomiarami skalibrowano tor pomiarowy przy użyciu kalibratora akustycznego B&K Typ 4231.

3.1. Wyniki weryfikacji pomiarowej

Na początku zmierzono warianty zawierające pojedynczą strukturę rezonansową. Na rysunku 8 przedstawiono wyniki wyznaczonej straty wtrącenia w przypadku wariantu XXA oraz XXB, zestawione z wynikami uzyskanymi z modelu numerycznego. Jak można zauważyć, wartości straty wtrącenia uzyskane w trakcie pomiaru różnią się amplitudą maksymalnej straty wtrącenia, jednak istnieje duża zgodność częstotliwości, w której występuje szczytowa strata wtrącenia. Jest to zgodne z wynikami otrzymywanymi w literaturze przedmiotu (Hall i in. 2020, Idczak i in. 2024). Dodatkowo rezultaty pomiarów obu struktur są bardzo zbliżone, co implikuje dobrą powtarzalność procesu wytwórczego.

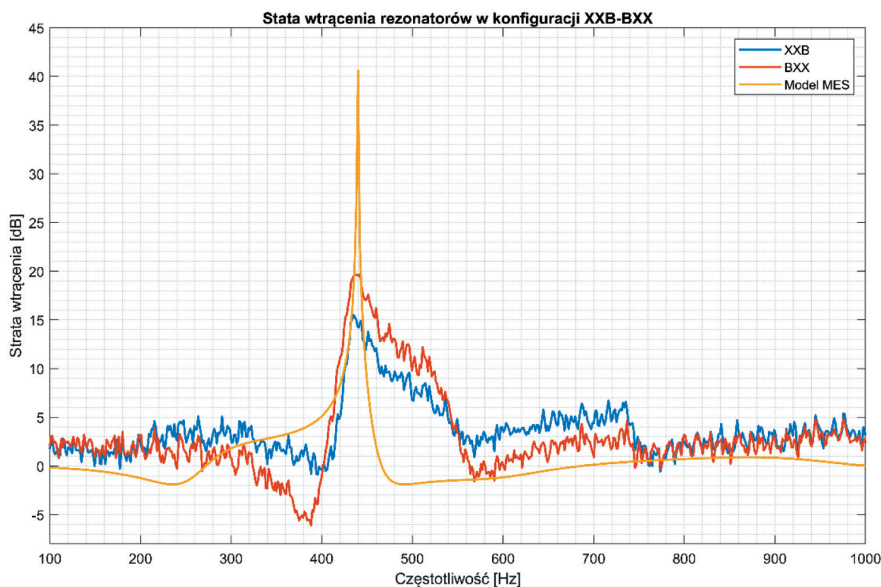


Rys. 8. Wyniki straty wtrącenia struktur rezonansowych w wariantach XXA oraz XXB zestawione z wynikami uzyskanymi przy użyciu modelu numerycznego

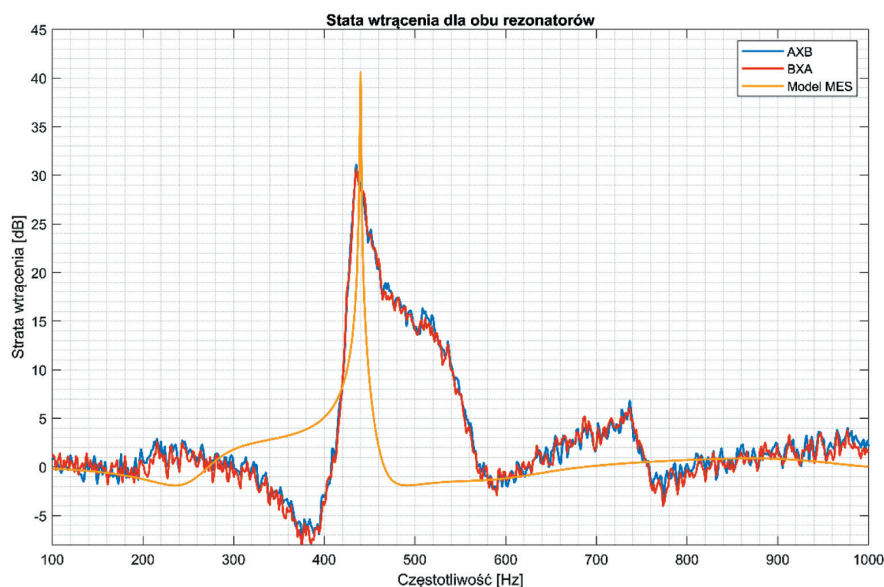
Zestawiono także wyniki uzyskane podczas pomiaru pojedynczej struktury umieszczonej w skrajnych slotach zestawu demonstracyjnego. Jak można zauważyć na rysunku 9, wyniki uzyskane w przypadku wariantu BXX są wyższe niż dla wariantu XXB. Jest to najprawdopodobniej związane z niedostateczną długością falowodu między modułami strukturalnymi a wylotem, co może powodować niestabilność pola akustycznego.

Zweryfikowano także warianty pomiaru, w których oba rezonatory były zamontowane w otworach uchwytu modułów strukturalnych. Warianty AXB oraz BXA przedstawiono na rysunku 10. Maksimum współczynnika pochłaniania dźwięku dla tego wariantu

wynosi 31,1 dB i występuje przy częstotliwości 435,1 Hz. Oznacza to rozbieżność względem modelu numerycznego wynoszącą 1,14%.



Rys. 9. Zestawienie wyników pomiarów uzyskanych w wariancie BXX oraz XXB z wynikami uzyskanymi przy użyciu modelu numerycznego



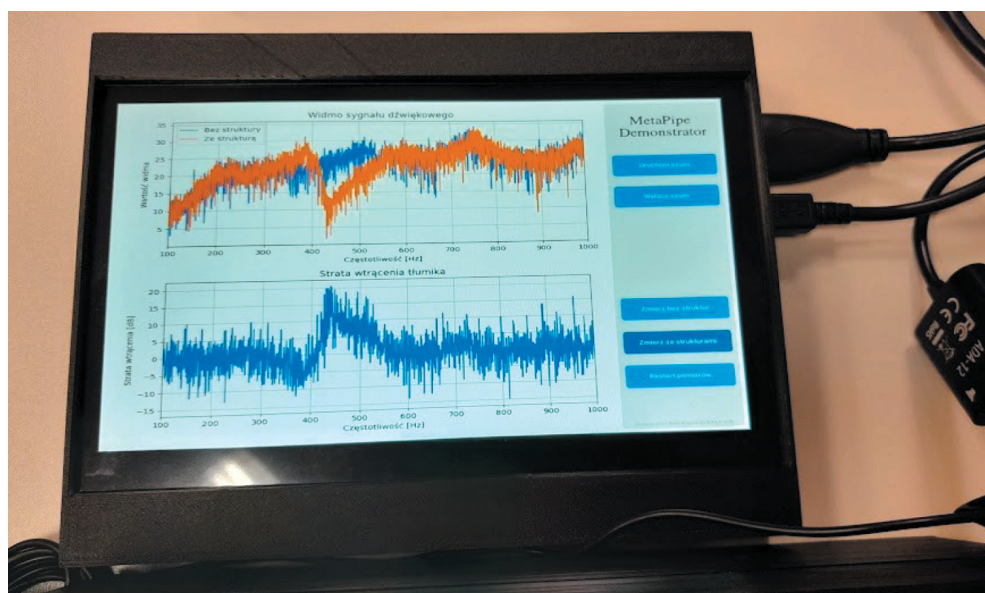
Rys. 10. Zestawienie wyników pomiarów uzyskanych w wariantach AXB oraz BXA z wynikami uzyskanymi przy użyciu modelu numerycznego

Pomiary weryfikacyjne wykazały, że zestaw demonstracyjny umożliwia prototypowanie oraz demonstrację funkcjonowania metamateriałowych struktur akustycznych. Dodatkowo pokazano, że opracowane struktury pozwalają na uzyskanie wysokiej akustycznej straty wtrącenia, która w zależności od wariantu montażu waha się od mniej więcej 16 dB aż do ponad 31 dB.

4. Aplikacja demonstracyjna

Zestaw demonstracyjny został przetestowany podczas terenowego dnia otwartego AGH. Z doświadczenia testowego wynikała potrzeba opracowania aplikacji umożliwiającej automatyzację procesu pomiaru stratności rezonatorów. Przygotowano dodatkowy moduł, który pozwala na przeprowadzanie demonstracji działania struktur w czasie rzeczywistym przy użyciu aplikacji demonstracyjnej. Moduł ten został złożony z mikrokomputera Raspberry Pi 4B, karty dźwiękowej USB Axagon ADA-12 oraz mikrofonu krawatowego Natec Bee. Do zestawu zakupiono także wyświetlacz dotykowy Waveshare 14628.

Przygotowano aplikację MetaPipe Demonstrator, której zadaniem jest demonstracja funkcjonowania metamateriałowych struktur dźwiękochłonnych na podstawie pomiaru poziomu ciśnienia akustycznego na wylocie falowodu. Aplikacja uzyskuje dwie funkcjonalności: generowania szumu białego oraz pomiaru. Interfejs graficzny aplikacji przedstawiono na rysunku 11.



Rys. 11. Interfejs aplikacji MetaPipe Demonstrator w trakcie demonstracji

Pomiar wykonywany w aplikacji składa się z dwóch etapów. W pierwszym kroku użytkownik jest proszony o zamontowanie referencyjnych modułów strukturalnych oraz umieszczenie mikrofonu przed wylotem falowodu. Następnie po uruchomieniu pomiaru zestaw jednocześnie generuje szum biały wzbudzający akustycznie powietrze we wnętrzu falowodu oraz rejestruje sygnał dźwięku odbierany przez mikrofon na końcu falowodu. Użytkownik jest proszony o zamontowanie struktur, które chce zbadać, następnie pomiar jest powtarzany. Na podstawie sygnałów zarejestrowanych w falowodzie referencyjnym oraz w falowodzie ze strukturami rezonansowymi wyznaczana jest różnica stanowiąca stratę wtrącenia struktur rezonansowych. Aplikacja umożliwia także reset, który usuwa wszystkie zapisane wartości i przywraca ustawienia do stanu początkowego.

5. Podsumowanie i możliwości rozwoju projektu

Stanowisko badawcze do demonstracji działania metamateriałowych struktur rezonansowych zostało opracowane w celu zaprezentowania zastosowań tłumików rezonansowych w przemyśle. Budowa stanowiska i jego modułowość sprawiają, że jest ono w łatwy sposób modyfikowalne oraz może zostać skonstruowane w wielu egzemplarzach stosunkowo niewielkim kosztem.

Dokonano optymalizacji struktur rezonansowych, które dostrojono do uzyskania optymalnej akustycznej straty przejścia w częstotliwości 440 Hz. Opracowana geometria została poddana testom pomiarowym, które jednocześnie zweryfikowały możliwości samego stanowiska badawczego. Pomiary potwierdziły skuteczność stanowiska badawczego w demonstrowaniu wpływu struktur rezonansowych na poziom ciśnienia akustycznego w falowodzie.

Dzięki łatwo modyfikowalnej konstrukcji zestawu projekt ma szerokie możliwości rozwoju. Przede wszystkim możliwe jest opracowanie struktur rezonansowych dostrojonych do różnych częstotliwości w celu uzyskania tłumienia poliharmonicznego lub szerokopasmowej akustycznej straty wtrącenia. Dodatkowo możliwe jest wykonanie innych struktur rezonansowych, na przykład rezonatorów ćwierćfalowych. Aplikację można także zmodyfikować pod kątem jej przydatności do pomiaru z wykorzystaniem innych sygnałów wzbudzających, jak na przykład sinusa przestrajanego.

Literatura

Bonyadi M.R., Michalewicz Z., 2017, *Particle Swarm Optimization for Single Objective Continuous Space Problems: A Review*, *Evolutionary Computation*, vol. 25, no. 1, s. 1–54, https://doi.org/10.1162/evco_r_00180.

- Chojak A., Binek W., Chojnacki B., Pawlik J., Idczak J., 2023, *The effect of sound-absorbing walls on the acoustic properties of the modelled unit cell of a sound-absorbing metamaterial*, *Vibrations in Physical Systems*, vol. 34, no. 2, art. 2023212, s. 1–8, <https://doi.org/10.21008/j.0860-6897.2023.2.12>.
- Chojnacka K., Kras A., Kamisiński T., 2022, *Sound Transmission Loss Calculation for Metamaterial Plate Using Combined Analytical and Numerical Approach*, *Vibrations in Physical Systems*, vol. 33, no. 3, art. 2022314, s. 1–8, <https://doi.org/10.21008/j.0860-6897.2022.3.14>.
- Chojnacki B., Pawlik J., Kamisinski T., 2021a, *Influence of different materials used for 3D printing in miniature speaker enclosure development*, [w:] *INTER-NOISE and NOISE-CON Congress and Conference Proceedings*, Institute of Noise Control Engineering (INCE), Washington, vol. 263, no. 1, s. 5631–5636, <https://doi.org/10.3397/in-2021-3188>.
- Chojnacki B., Terry Cho Sang-ik, Mehra R., 2021b, *Full range omnidirectional sound source for near-field head-related transfer-functions measurement*, *Journal of the Audio Engineering Society*, vol. 69, no. 5, s. 323–339, <https://doi.org/10.17743/jaes.2021.0004>.
- Chojnacki B., Schynol K., Halek M., Muniak A., 2023, *Sustainable Perforated Acoustic Wooden Panels Designed Using Third-Degree-of-Freedom Bezier Curves with Broadband Sound Absorption Coefficients*, *Materials*, vol. 16, no. 18, art. 6089, <https://doi.org/10.3390/ma16186089>.
- Chojnacki B., Chojak A., Binek W., Idczak J., Pawlik J., 2024, *Numerical modeling of the elementary metamaterial cells for the sound-absorbing structure preparation*, *Vibrations in Physical Systems*, vol. 35, no. 1, art. 2024114, s. 1–6, <https://doi.org/10.21008/j.0860-6897.2024.1.14>.
- Ciochon A., Kennedy J., Leiba R., Flanagan L., Culleton M., 2023, *The impact of surface roughness on an additively manufactured acoustic material: An experimental and numerical investigation*, *Journal of Sound and Vibration*, vol. 546, art. 117434, <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2022.117434>.
- Hall A.J., Dodd G., Calius E.P., 2020, *Multiplying resonances for attenuation in mechanical metamaterials: Part 1 – Concepts, initial validation and single layer structures*, *Applied Acoustics*, vol. 170, art. 107513, <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2020.107513>.
- Idczak J., Chojnacka K., Rubacha J., Kamisiński T., 2024, *Investigation of impact sound transmission through various mechanical connectors of lightweight structures*, *Vibrations in Physical Systems*, vol. 35, no. 1, art. 2024115, s. 1–9, <https://doi.org/10.21008/j.0860-6897.2024.1.15>.
- Jiménez N., Romero-García V., Pagneux V., Groby J.-P., 2017, *Rainbow-trapping absorbers: Broadband, perfect and asymmetric sound absorption by subwavelength panels for transmission problems*, *Scientific Reports*, vol. 7, no. 1, art. 13595, <https://doi.org/10.1038/s41598-017-13706-4>.

- Jiménez N., Umnova O., Groby J.-P., 2021, *Topics in Applied Physics 143 Acoustic Waves in Periodic Structures, Metamaterials, and Porous Media From Fundamentals to Industrial Applications*, Springer, Cham, <https://doi.org/10.1007/978-3-030-84300-7>.
- Langfeldt F., Hoppen H., Gleine W., 2020, *Broadband low-frequency sound transmission loss improvement of double walls with Helmholtz resonators*, Journal of Sound and Vibration, vol. 476, art. 115309, <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2020.115309>.
- PN-EN ISO 10534-2:2024-04, *Akustyka – Określanie właściwości akustycznych w rurach impedancyjnych – Część 2: Metoda dwóch mikrofonów dla prostopadłego współczynnika pochłaniania dźwięku oraz prostopadłej izolacyjności akustycznej*, Polski Komitet Normalizacyjny, Warszawa.
- Prasetyo I., Wongso E.N., Sarwono J., 2019, *Developing Sub-wavelength Sound Absorber Based on Coiled Up Tube Resonator*, Journal of Engineering and Technological Sciences, vol. 51, no. 3, s. 323–336, <https://doi.org/10.5614/j.eng.technol.sci.2019.51.3.2>.
- Yang M., Sheng P., 2017, *Sound Absorption Structures: From Porous Media to Acoustic Metamaterials*, Annual Review of Materials Research, vol. 47, s. 83–114, <https://doi.org/10.1146/annurev-matsci-070616-124032>.
- Zhang X., Cheng L., 2019, *Acoustic impedance of micro-perforated panels in a grazing flow*, Journal of the Acoustical Society of America, vol. 145, no. 4, s. 2461–2469, <https://doi.org/10.1121/1.5098785>.

Emerytowani pracownicy naukowci – okoliczności towarzyszące przejściu w stan spoczynku

Agata Maksymowicz 

AGH Akademia Górniczo-Hutnicza, Wydział Humanistyczny, Kraków

Streszczenie: W dzisiejszym świecie, szczególnie w Europie, problematyka starości stanowi istotny aspekt zainteresowań badaczy społecznych. Dłuższy czas trwania życia ludzkiego, postęp medycyny oraz spadek liczby rodzących się dzieci oznacza, że żyjemy w coraz bardziej starzejącym się społeczeństwie. Tematem niniejszego artykułu jest zagadnienie okoliczności towarzyszących przechodzeniu na emeryturę pracowników naukowych krakowskich uczelni. Ten szczególny etap życia człowieka oznacza, że kończy się wtedy (często stopniowo) trwający zazwyczaj kilkadziesiąt lat czas trwania pracy zawodowej. Jak postrzegany jest ten okres przez emerytowanych uczonych? Czy decyzja o przejściu w stan spoczynku podejmowana jest suwerennie przez samych uczonych, jaką pomoc otrzymują w tym szczególnym okresie oraz jak przygotowują się do tego nowego etapu życia? Te zagadnienia stanowią jeden z aspektów szerszego projektu badawczego zrealizowanego przez czteroosobowy zespół pracowników Wydziału Humanistycznego AGH.

Słowa kluczowe: starość, seniorzy, emerytura, uczelnia, akademicy, uczeni

RETIRED ACADEMIC EMPLOYEES – CIRCUMSTANCES ACCOMPANYING THE TRANSITION TO RETIREMENT

Abstract: In today's world, particularly in Europe, the issue of aging is of significant interest for social researchers. Increased life expectancy, advances in medicine, and declining birth rates mean that we live in an increasingly aging society. The subject of this article is the circumstances surrounding the retirement of academic employees from universities in Krakow. This particular stage of a person's life signifies the end (often gradual) of what is usually a several-decades-long professional career. How do retired scholars perceive this period, is the decision to retire made independently by the scholars themselves, what assistance do they receive during this special time, and how do they prepare for this new stage of life? These questions are part of a broader research project conducted by a team of four staff members from the Faculty of Humanities at AGH University of Krakow.

Keywords: old age, seniors, retirement, university, academics, scholars

https://doi.org/10.7494/978-83-68219-20-3_5

1. Wprowadzenie: socjologiczna problematyka starości

Problematyka starości stanowi niezwykle istotny aspekt dyskursu naukowego, szczególnie takich dyscyplin naukowych, jak: medycyna, gerontologia, psychologia, socjologia, demografia, polityka społeczna, ekonomia (tzw. srebrna gospodarka). Stworzyły one takie podejścia, jak między innymi: teoria wycofania, teoria modernizacji, koncepcja biegu życia, teoria aktywnego starzenia się, teoria subkultury (Halicki 2006).

Żyjemy w starzejącym się społeczeństwie, które charakteryzuje się wzrostem liczby osób w podeszłym wieku, wydłużeniem długości trwania życia ludzkiego (głównie dzięki coraz skuteczniejszej medycynie) i spadkiem liczby urodzeń.

Termin „starość” jest niejednoznaczny i niejednolity. Wyznaczane są różne progi wiekowe dotyczące tego, które kategorie społeczne ludności należy uznać za przynależące do tego ostatniego etapu życia ludzkiego. Najczęściej mówi się o trzech etapach starości: wiek podeszły (tzw. wczesna starość, późna dorosłość) – od 60 do 74 lat, wiek starczy – 75–89 lat (tzw. pośrednia starość), długowieczność – 90 i więcej lat (tzw. późna starość, wiek sędziwy). Kryteria te są zgodne z wytycznymi Światowej Organizacji Zdrowia.

Jedną z socjologicznych propozycji dotyczących sposobu definiowania starości jest wskazanie na potrzebę uwzględnienia trzech aspektów: indywidualnego, zbiorowego i jakościowego. Biorąc pod uwagę ten pierwszy, można określać starość z punktu widzenia jednostek, które w dzisiejszych czasach żyją znacznie dłużej niż w przeszłości. Perspektywa zbiorowego spojrzenia na temat starości wskazuje na wzrost liczby osób starych w społeczeństwie w odniesieniu do pozostałych kategorii wiekowych ludności. Aspekt jakościowy odnosi się z kolei do analizy zmian zachodzących w aktywnościach życiowych charakterystycznych dla osób w wieku senioralnym, np. zakończenia kariery zawodowej i rozpoczęcia następnego etapu w nowej roli społecznej – emeryta z szerokim spektrum nowych możliwości, które mogą być wykorzystane lub nie. W tym ujęciu istotny jest również subiektywny obraz człowieka, który sam postrzega siebie jako osobę starą. Taka samoocena może być powiązana na przykład z pogarszającą się kondycją zdrowotną w wieku senioralnym (Krzyżowski 2013). Z perspektywy niniejszego artykułu ważna wydaje się ta ostatnia, jakościowa perspektywa analizy starości, szczególnie w kontekście zmian zachodzących w życiu człowieka po przejściu na emeryturę.

Nieco inne podejście, chociaż korespondujące z powyższym, postuluje badanie starości w kontekście całokształtu przebiegu życia, przebytych doświadczeń oraz w powiązaniu z otoczeniem społecznym jednostki. Tu kluczowe jest pojęcie przejścia (*transition*) między pełnionymi rolami społecznymi, na przykład przejście od roli pracownika do roli emeryta, od roli matki/ojca do roli babci/dziadka (Zalewska 2015).

Przejście na emeryturę, czyli początek nowego etapu życia, stanowi podstawę analizy jakościowej przedstawionej w poniższych rozważaniach. Omówione zostaną okoliczności towarzyszące decyzji o przejściu w stan spoczynku, zakres przygotowania do

tego czasu pracowników naukowych, towarzyszące temu emocje i odczucia, stopień pomocy ze strony uczelni.

2. Metoda badawcza i charakterystyka badanej społeczności

W 2023 r. został zrealizowany pierwszy etap jakościowych badań socjologicznych, dotyczących problematyki emerytowanych pracowników naukowych krakowskich uczelni. Przeprowadzone zostały z tymi osobami swobodne wywiady pogłębione, aby poznać ową społeczność, rzadko dotychczas znajdującą się pod lupą badaczy społecznych.

Tytuł minigrantu wydziałowego, którego kierownikiem jest dr Łucja Kaprańska, brzmi: *Życie po uczelni – pracownicy nauki „w stanie spoczynku” i ich aktywność na emeryturze na przykładzie środowiska naukowego Krakowa*. Dzięki zaprojektowanym i przeprowadzonym badaniom nasz czteroosobowy zespół chciał się dowiedzieć, jak emerytowani uczeni oceniają przebieg swojej kariery zawodowej, jak wyglądał proces rozstawania się z uczelnią, jakie okoliczności towarzyszyły temu etapowi ich życia, czy decyzja o emeryturze była autonomiczna, czy też wymuszona. Interesujące było również to, jak teraz obecnie wygląda ich życie, jak organizują swoją codzienność, relacje rodzinne i towarzyskie, hobby i zainteresowania. Analizowana była również ich kondycja zdrowotna oraz sytuacja materialna na emeryturze (poczucie dobrostanu ekonomicznego), a przede wszystkim, jak oceniają oni działania uczelni, w których byli zatrudnieni, nakierowane na byłych pracowników: czy utrzymują z tymi instytucjami kontakty, czy otrzymują informacje, na przykład dotyczące świadczeń socjalnych i zaproszenia na wydarzenia (naukowe lub towarzyskie) organizowane przez katedry, wydziały bądź całe uczelnie. Czy ktoś o nich pamięta? Czy w Polsce istnieje określony status zwany w świecie *profesor emeritus*, czy korzysta się z bogatego doświadczenia i wiedzy emerytowanych uczonych?

Nasze badania przeprowadzone zostały również w Akademii Górniczo-Hutniczej. Mamy nadzieję, że udało nam się poznać tę niezwykłą społeczność i w niedalekiej przyszłości zostaną sformułowane rekomendacje dla władz AGH, dotyczące oczekiwań emerytowanych pracowników naukowych wobec uczelni, w której spędzili znaczną część swojego życia.

Zbieranie danych dotyczących badanej populacji oparte było na zastosowaniu i przeprowadzeniu wywiadów swobodnych, pogłębionych, umożliwiających często obszernie, nieskrępowane wypowiedzi badanych, które dają sposobność poznania tych osób – ich sposobu myślenia, emocji, wzorów zachowań, postaw i poglądów (Nicpoń i Marzęcki 2010). W 2023 r. przeprowadzono dwanaście wywiadów z emerytowanymi naukowcami krakowskich uczelni (Uniwersytet Jagielloński, Akademia Górniczo-Hutnicza, Akademia Wychowania Fizycznego, Uniwersytet Rolniczy, Uniwersytet im. Komisji Edukacji Narodowej, Uniwersytet Ekonomiczny). Badani reprezentowali różne dyscypliny

naukowe, takie jak: pedagogika, filozofia, filologia (polska, rosyjska, romańska), zoo-technika, trenerstwo (narciarstwa, gimnastyki, łyżwiarstwa), farmacja, politologia. Jeśli chodzi o stopnie naukowe, byli to doktorzy, doktorzy habilitowani oraz profesorowie.

3. Wyniki przeprowadzonych badań

3.1. Przygotowanie do emerytury

Badania socjologiczne, przeprowadzone na reprezentatywnej próbie Polaków, wskazują, że emeryci uznają za konieczne wcześniejsze przygotowanie się do życia po zakończeniu pracy. Najważniejsze kwestie w tym zakresie to według nich: utrzymywanie bliskich relacji z rodziną, prowadzenie zdrowego stylu życia dla zachowania sprawności, oszczędzanie pieniędzy, regularne badania profilaktyczne i wizyty u lekarzy, utrzymywanie kontaktów nie tylko z ludźmi z pracy, ale szerszym gronem znajomych i przyjaciół, systematyczna aktywność fizyczna, pielęgnowanie własnych zainteresowań, rozwijanie nowych umiejętności (Adamczyk 2018). Takie bardzo racjonalne i rozsądne opinie mają charakter deklaracyjny. Nie wiadomo, czy znajdują one praktyczne zastosowanie w rzeczywistych działaniach ludzi.

Nasze badania pokazują, że emerytowani uczeni nie przywiązują wielkiej wagi do odpowiedniego przygotowania do przejścia na emeryturę. Oto przykładowe wypowiedzi na ten temat:

Po prostu rektor po dodatkowym roku pracy rozwiązuje umowę, żadnych przygotowań. Emerytura to automat, po co się przygotowywać. (Wywiad nr 1, K, 74 lata, 3 lata na emeryturze)

Specjalnie nie (przygotowywałem się). Bo miałem tę odskocznnię po prostu syna chłopskiego. I mam kawałek działki, mam kawałek lasu, mam domek wybudowany (...) i tam sobie żyję, i jest mi fajnie. (Wywiad nr 5, M, 80 lat, 10 lat na emeryturze)

Nie, nie myślałam o tym, bo byłam bardzo zajęta, poza tym akurat to był okres, kiedy pisałam jedną książkę za drugą i naprawdę było to dla mnie trudne. (Wywiad nr 12, K, 76 lat, 5 lat na emeryturze)

Właściwie przygotowania polegały na takich administracyjnych sprawach, na uczelni, ale innych jakichś czynności nie wykonywałam. (Wywiad nr 2, K, 74 lata, 15 lat na emeryturze)

Kiedy nadszedł ten wiek, poszłam do działu, kiedy zbliżałam się do siedemdziesiątki. Wiedziałam, że jako profesor mogę pracować do siedemdziesięciu lat. Bo to u nas było jeszcze tak, że po siedemdziesiątce można było pracować albo przez cały rok na pół etatu, ja tak zrobiłam, bo miałam seminarium do skończenia, albo na cały etat przez jeden semestr. Ja wybrałam to dłuższe, gdzie miałam tylko te trzy godziny w tygodniu, ale za to przez cały rok. (Wywiad nr 9, K, 75 lat, 4 lata na emeryturze)

Należy wskazać, że pracownicy naukowcy na ogół często, chociaż oczywiście nie wszyscy, korzystają z możliwości dłuższego pozostania w murach uczelni, profesorowie na ogół do 70. roku życia, a adiunkci do 67. roku bez względu na płeć.

Natomiast z jednej rzeczy nie skorzystałam świadomie, celowo, mianowicie mogłam przejść na emeryturę już w wieku 65 lat, czyli w 2012 i potem zatrudnić się, ale już nie jako mianowana, tylko na takim etacie i właściwie miałabym i emeryturę, i jeszcze etat, prawda. (Wywiad nr 12, K, 76 lat, 5 lat na emeryturze)

Wśród badanych tylko jeden mężczyzna został emerytem w wieku 65 lat, pracując nadal na swojej uczelni na podstawie umowy zlecenia, a jedna kobieta przeszła na wcześniejszą emeryturę w wieku 59 lat.

Była taka możliwość przejścia na wcześniejszą emeryturę. No i sprawy domowe, przeprowadzka, rozbudowa domu. Musiałam więcej być, nadzorować to wszystko. Ta decyzja była taka przemyślana i skorzystałam z tej możliwości, że można iść na wcześniejszą emeryturę, i przeszedłam. (Wywiad nr 2, K, 74 lata, 15 lat na emeryturze)

Z powyższej wypowiedzi wynika, że znalazły się konkretne powody krótszej pracy, generalnie jednak pracownicy naukowcy pracują dłużej, niż umożliwia to ustawowo określony wiek uprawniający do uzyskania świadczenia emerytalnego.

Pracownicy naukowcy podkreślają, że nie zaprzęтали sobie głowy jakimiś szczególnymi przemyśleniami i przygotowaniem do przejścia w stan spoczynku. Być może wynika to z faktu, że idą na emeryturę przeważnie znacznie później niż inne grupy zawodowe i ten fakt sam w sobie stanowi już bardzo istotny element budowania poczucia dobrostanu po zakończeniu pracy zawodowej, a także już przebywając na emeryturze, kontynuują nauczanie studentów i doktorantów. Te decyzje należy zaliczyć do działań zmierzających do przygotowania się na czas przebywania na emeryturze, chociaż sami badani tak tego nie interpretują. Dłuższy czas pracy sprawia, że nauczyciele akademicki mogą liczyć na wyższe finansowe świadczenia emerytalne, a co za tym idzie lepszy komfort życia.

3.2. Stopień autonomiczności decyzji o przejściu na emeryturę

Respondenci, zapytani o to, czy decyzja o przejściu na emeryturę była suwerenna i podejmowana samodzielnie, najczęściej potwierdzali jej autonomiczność i brak nacisków ze strony uczelni.

Nie, nie. Absolutnie. Własna decyzja. Tutaj pani prodziekan prosiła mnie o poprowadzenie zajęć jeszcze w tym roku, ale odmówiłam. (Wywiad nr 3, M, 72 lata, 7 lat na emeryturze)

Nie było takiego myślenia (o naciskach). Nie, absolutnie nie. Po prostu wszystko działo się bezpośrednio, naturalnie. (Wywiad nr 4, M, 78 lat, 11 lat na emeryturze)

Nie, uznałem, że już wypada, jak miałem już siedemdziesiąt lat. Że już koniec, koniec i też dojeżdżania. (Wywiad nr 5, M, 80 lat, 10 lat na emeryturze)

Niektórzy podkreślali, że odejście na emeryturę odbywa się niejako automatycznie, zgodnie z uczelnianymi przepisami w tym zakresie.

Uczelnia czas jakiś wcześniej wymogła na nas oświadczenie, kiedy przejdziemy na emeryturę. I zasugerowała, że no ja miałam 40 lat pracy, w związku z tym i 65 lat ukończonych, nie, nie ukończonych, ale brakło mi tam dni. Także nic, dosłownie nic (propozycji przedłużenia). (Wywiad nr 11, K, 85 lat, 20 lat na emeryturze)

U nas się przechodzi w wieku siedemdziesięciu lat i jest to, tak jak pani mówiłam, jest to automatyczne. To znaczy, po prostu, profesor mianowany, mówię o profesorach, bo jeśli ktoś nie jest profesorem tytularnym, tylko profesorem uniwersyteckim, to musi odejść w wieku sześćdziesięciu pięciu lat, koniec, kropka i to nawet w ogóle jest, no musi odejść. Natomiast tytularny, prawda, z tytułem naukowym do siedemdziesięciu lat i to też jest tak – tak mi to tłumaczono w kadrach, że to się automatycznie rozwiązuje. (Wywiad nr 12, K, 76 lat, 5 lat na emeryturze)

To znaczy, wie pani, no nie, to wynikało też z przepisów po prostu, bo ja miałem umowę na czas nieokreślony, oczywiście ja mogłem nie chcieć odejść, mógłbym powiedzieć, że nie, zostaje i koniec, ale nie chciałem, wie Pani, no jak to się mówi, tutaj kolegom wchodzić w paradę. Natomiast zgodnie z przepisami, no ja wiek emerytalny osiągnąłem w wieku sześćdziesięciu pięciu lat. Tak, tylko na uczelni można do sześćdziesiąt siedem, prawda? No do siedemdziesięciu, ale to profesorowie, proszę Pani, natomiast ja, jako że miałem na czas nieokreślony umowę, jakbym nie odszedł, to musieliby mnie dyscyplinarnie zwolnić, a nie było takich podstaw, prawda? Znaczy, bo i tak miałem przedłużone, bo nie sześćdziesiąt pięć, tylko tamte sześćdziesiąt siedem, prawda? Ale potem mówię, a, będę miał święty spokój, bo to się tak mówi, no przecież te zajęcia Pani też prowadzi, więc ja wiem, że to jest absorbujące. (Wywiad nr 4, M, 78 lat, 11 lat na emeryturze)

Jeszcze inni wspominali o dodatkowych, zróżnicowanych okolicznościach, mających wpływ na tę decyzję.

Był taki moment, że pensum trudno było wypracować w całości. Niekorzystnie to wpływało na współpracowników, bo im to utrudniało uzyskanie własnego pensum i dodatkowych (godzin). Dodatkowych finansowych jakichś tam spraw. Nacisków nie było. Czyli własna decyzja suwerenna. Własna decyzja. Bardzo wspomagali mnie współpracownicy, ale moja sytuacja, charakter zajęć, który cały czas prowadziłam, wymagał odpowiedniej kondycji, odpowiedniej sprawności fizycznej. A niestety z wiekiem to troszeczkę już na 100% nie mogłam dawać z siebie. Także podjęłam tę decyzję. (Wywiad nr 2, K, 74 lata, 15 lat na emeryturze)

Nie, nie, nie, już były potrzebne miejsca, etaty i tak dalej. Ja jestem pod tym względem mało ambitna. Uważam, że skoro mnie nikt nie potrzebuje, to nie, nie. Cały psa w nos. Nie, nie, nie, absolutnie, nic. Nic, nic, nic. Tak. No odpowiedziałam, że po tym względem jestem mało ambitna, w związku z tym o goryczy nie ma co mówić. Tym bardziej, że jak Pani widzi, ja się realizuję, że tak powiem, tak, w innych sferach. (...) Miałam 65 lat. Myśmy z mężem, który także pracował na uczelni, umówili się, bo on był rok ode mnie starszy i w związku z tym umówiliśmy się, że on jeszcze jeden rok będzie pracował, a (...) jak ja skończę 65 lat – to obydwójce pójdziemy na emeryturę. No i wtedy się okazało, że mój mąż, który pracował w takiej, szmakiej, owakiej komisji i tak dalej, uczelnia (...) zawali się bez mojego męża. No i wtedy ktoś się musiał zająć

domem, wnukami i tak dalej. No i ja przejęłam tę funkcję, a mój mąż pracował prawie do śmierci. (Wywiad nr 11, K, 85 lat, 20 lat na emeryturze)

Nie, ja w pewnym momencie poczułam się już wypalona zawodowo, już mi się nie chciało pracować i tylko dlatego, że mi się nie chciało pracować, przeszłam na emeryturę. Obliczyłam, że finansowo dam radę, syn już jest samodzielny, na własnym utrzymaniu, także nie potrzebuje mojego wsparcia, także pracuję, znaczy pracowałam sama dla siebie na emeryturę, przeszłam sama dla siebie, tylko dlatego, że już poczułam, że już dość. To było takie racjonalne posunięcie. Tak, to było takie racjonalne posunięcie, stwierdziłam, że czterdzieści lat to zdecydowanie za dużo, i dlatego zdecydowałam się. Poza tym urodził nam się wnuk i to z myślą o przyszłości, wprawdzie w tej chwili jeszcze synowa jest na urlopie macierzyńskim, ale już od stycznia idzie do pracy, no więc postanowiłam, że ich wesprę w ten sposób, że się dzieckiem zajmę. Tak, nikt mnie nie namawiał, nikogo się nie radziłam. (Wywiad nr 8, 65 lat, 1 rok na emeryturze)

Z powyższych wypowiedzi wynika, że problem z pensum dydaktycznym, czyli czynniki zewnętrzne, instytucjonalne lub te wewnętrzne, takie jak pogarszająca się kondycja fizyczna i/lub psychiczna (np. zmęczenie, wypalenie zawodowe), mają znaczenie przy podejmowaniu decyzji o zakończeniu kariery zawodowej. Pojawiła się też konstatacja o poczuciu braku dalszej przydatności, byciu niepotrzebnym. Istotne w tym zakresie są również kwestie rodzinne badanych, chociażby chęć pomocy i opieki nad wnukami lub innymi członkami rodziny. Zatem można powiedzieć, że sami respondenci podkreślają samodzielność w podejmowaniu decyzji o emeryturze, a jednocześnie dostrzegają pewien spłot różnorodnych okoliczności wpływających na zrealizowanie konkretnego planu przejścia w stan spoczynku.

3.3. Pomoc uczelni, pożegnanie i emocje towarzyszące zakończeniu pracy zawodowej

Czy pracownicy naukowcy mogli liczyć na pomoc związaną z formalnościami towarzyszącymi odejściu na emeryturę ze strony uczelni? Odpowiedź na to pytanie brzmi twierdząco. Nasi rozmówcy podkreślali dużą sprawność w tym zakresie, szczególnie ze strony działu kadr, dzięki któremu cała procedura toczyła się niejako automatycznie i sprawnie, bez konieczności jakiegoś szczególnego angażowania samych zainteresowanych.

W ogóle całą tę koncepcję przejścia na emeryturę z równoczesnym podjęciem, ponownie pracy, to tak, to nasz dział kadr, to jest taka mądra pani, która wie wszystko, i ona *de facto* przygotowała wszystkie materiały. (Wywiad nr 3, M, 72 lata, 7 lat na emeryturze)

Kiedy nadszedł ten wiek, poszłam do działu, kiedy zbliżałam się do siedemdziesiątki. Wiedziałam, że jako profesor mogę pracować do siedemdziesięciu lat. (Wywiad nr 9, K, 75 lat, 4 lata na emeryturze)

Zapytani o emocje towarzyszące zakończeniu swojej długoletniej pracy i przejściu na emeryturę, rozmówcy udzielali mocno zróżnicowanych odpowiedzi: od pewnej obojętności do zadowolenia, ulgi, ale też wzruszenia czy zmartwienia i żalu. W tym ostatnim przypadku negatywnym emocjom towarzyszyły smutne okoliczności związane z ciężką chorobą.

Wie Pani, nie miałem jakichś specjalnych oczekiwań w stosunku do okresu, w którym mam przejść na tak zwaną emeryturę. Przyznam się szczerze, że to przyjście było dla mnie niedostrzegalne zupełnie. (Wywiad nr 10, M, 75 lat, 9 lat na emeryturze)

Emocje? Zadowolenie to na pewno, taka swoista radość, że nic nie muszę, że wszystko mogę, poczucie wolności, że nie jestem od niczego uzależniona, a mimo to mogę uczestniczyć w życiu katedry, bo mnie zapraszają na zebrania, na spotkania, więc jeśli tylko mam ochotę, to mogę uczestniczyć. Bardzo miło mnie pożegnano już teraz, jak już skończyłam te pół roku, znaczy te pół etatu, więc na Radzie Wydziału specjalne były podziękowania dla mnie, więc to było takie miłe, sympatyczne, że nie znikam od tak po prostu, ale że moje odejście jest dostrzeżone. Nie wiem, czy szczerze, czy nie, ale wszyscy mówili, że będzie im mnie brakowało, więc to takie miłe było, także same pozytywne emocje, jeśli chodzi o odejście na emeryturę. (Wywiad nr 8, 65 lat, 1 rok na emeryturze)

Nie było łatwo (przerwać tę pracę). (...) Nie było łatwe. Nie było łatwo, ale wie Pani co? Zaskoczony tą chorobą myślałem o tym, głównie miałem w głowie, co zrobić, żeby przeżyć. To jest raz. A dwa, jak się potem z tego stanu bardzo słabości wielkiej, po leczeniu, jak się wygrzebać. To miałem w głowie. To było, wie Pani, jakiś nakaz chwili. Nakaz chwili wynikających z choroby. (Wywiad nr 6, M, 85 lat, 10 lat na emeryturze)

Niektórzy badani przywoływali wspomnienia związane ze zorganizowanym specjalnie dla nich okolicznościowym pożegnaniem, sygnalizując, że było to dla nich ważne wydarzenie. Znalazło się jednak w tych wypowiedziach podkreślenie, że nie wszystkie osoby życzą sobie takiego ceremonialnego sposobu zakończenia pracy zawodowej.

Nie, wie Pani co, no zupełnie taką atrakcją to było pożegnanie, więc pożegnanie w instytucie. Wszyscy przyszli oczywiście. Wręczyli mi piękny album z fotografiami z Krakowa, proszę Panią, z podpisami wszystkich pracowników. No i w takiej atmosferze miłej i pogodnej. Niewątpliwie byłem wzruszony, no, ale wie Pani, nie za bardzo nawet. Tak pomyślałem sobie, no tak jakoś się przechodzi, no to trzeba po prostu w tym jakoś się odnaleźć. (Wywiad nr 10, M, 75 lat, 9 lat na emeryturze)

U nas zawsze tak jest akurat w instytucie, że się żegna. Mamy zawsze spotkanie koleżeńskie, żegnamy zawsze tych, którzy odchodzą na emeryturę. Nie tylko profesorowie, to wiadomo, ale mówię także o lektorach, wykładowcach. Każdy potem ma prawo do takiego, znaczy tak po prostu u nas się urządza, składamy się na to. To nie z pieniędzy, z funduszy jakichś instytutowych, tylko składkowych, własnych. Zawsze się spotykamy i żegnamy tego kogoś. No i tyle. Jak są jakieś uroczystości w instytucie, to się zaprasza. Nie zawsze ci emeryci przychodzą. Mam takie koleżanki, które w ogóle zerwały kontakty. W ogóle się nie pokazują. (Wywiad nr 12, K, 76 lat, 5 lat na emeryturze)

Odnotowane zostały również mniej optymistyczne opinie związane z zakończeniem pracy, dotyczące złej atmosfery panującej na wydziale lub w katedrze.

Są ludzie młodzi, oni wolą, żeby mieć nadgodziny, gdybym ja pracował, to bym zabierał przecież te nadgodziny. Tak, bo tych godzin dużo nie jest. (Wywiad nr 4, M, 78 lat, 11 lat na emeryturze)

Trochę jestem człowiekiem zadania. No i jak już nie miałam tam zadania, no to już nie wiem. A więzi też nie miałam. Dlatego, że moi przyjaciele, z którymi bardzo dobrze mi się pracowało, ja zostałam sama właściwie z tej paki naszej, z którą znakomicie się pracowało. Natomiast też atmosfera w tym okresie akurat nie była najlepsza. Poczulałam się taka trochę niewykorzystana, dotknięta. Nikt nigdy nie włączył mnie do projektów, które pewnie realizowali, a w których bym ogromnie pomogła. Więc tak poczułam się, źle potraktowana tak naprawdę. Ale mam ogromny, natomiast do uczelni, jako akademik, mam ogromny sentyment (...) do wydziału mniejszy, bo też nie było integracji, mówiąc szczerze, pomimo różnych prób takich, powiedziałabym, dość histeryczno-rozpaczliwych. To *de facto* prawdziwej integracji wydziałowej nie było. Ci ludzie, z którymi cokolwiek mnie łączyło, w zasadzie w większości, nie pracowali już jak ja. (Wywiad nr 7, K, 74 lata, 6 lat na emeryturze)

W tych ostatnich wypowiedziach obserwujemy poczucie braku przydatności i niewłaściwego traktowania przez przełożonych lub młodszych kolegów oraz istotne spostrzeżenie, że z uczelni zniknęli już najbliżsi koledzy i koleżanki. Przychodzi nowe: projekty naukowe, pracownicy, przełożeni, i wytwarza się świadomość małego znaczenia własnej osoby jako pracownika. Warto zwrócić uwagę na tego typu refleksje, ponieważ sygnalizują one istnienie pewnych problemów i napięć w miejscu pracy oraz ich negatywny wpływ na samoocenę i samopoczucie osób odchodzących w stan spoczynku.

4. Zakończenie

W przypadku większości pracowników naukowych początek emerytury (kilka pierwszych lat) nie oznacza natychmiastowego i całkowitego zakończenia kariery zawodowej. Bardzo często przez mniej więcej dwa lata prowadzą oni jeszcze zajęcia dla studentów i konsultacje z doktorantami oraz piszą i publikują książki, artykuły i recenzje. Przejście w stan spoczynku nie oznacza zatem końca aktywności naukowej i dydaktycznej. Przeszkodę kontynuowania takiej działalności stanowi najczęściej zły stan zdrowia lub obowiązki rodzinne – pełnienie roli dziadka/babci czy opieka nad chorym małżonkiem.

Generalnie przedstawione okoliczności związane z przejściem na emeryturę – zarówno te instytucjonalne, jak i związane z poczuciem dobrostanu uczonych w stanie spoczynku – mają pozytywny, optymistyczny wydźwięk. Są jednak również ważne sygnały o charakterze instytucjonalnym oraz na poziomie relacji interpersonalnych

między seniorami a pracownikami uczelni (w tym również ich przełożonymi) wskazujące pewne nieprawidłowości w sposobie traktowania starszych pracowników naukowych. Jeśli do tego typu niepożądanych sytuacji dodamy kwestie związane z pogarszającą się kondycją zdrowotną badanych osób, co sygnalizują niektóre z nich, mamy zarysowaną sytuację jakości życia emerytowanych akademików. Szczególnie istotna w tym kontekście wydaje się konieczność tworzenia i realizowania nowych aktywności życiowych, aby wypełnić puste miejsca w biografii człowieka, powstałe po zakończeniu pracy zawodowej, jak postuluje teoria aktywnej starości (Halicki 2006). Badania emerytowanych pracowników naukowych, prowadzone na Wydziale Humanistycznym AGH, pokazują, że ta społeczność potrafi aktywnie i dobrze wykorzystywać czas po zakończeniu pracy zawodowej. Często kontynuują swoje dotychczasowe zainteresowania naukowe oraz rozwijają nowe strategie dotyczące aktywności życiowych, nawet pomimo pojawiających się problemów zdrowotnych.

Na jakość życia w wieku senioralnym wpływają takie obiektywne czynniki, jak: zdrowie, sprawność funkcjonalna, sytuacja rodzinna, warunki ekonomiczne, aktywność, utrzymywanie kontaktów i więzi społecznych (Bonk i Retowski 2013). Interesujący wydaje się w tym kontekście fakt, że emerytury i starości bardziej obawiają się osoby młodsze, które nadal pracują, niż te, które osiągnęły wiek emerytalny (Adamczyk 2018). Kwestie, takie jak: kontrola nad przebiegiem własnego życia, możliwość zaspokajania potrzeb, samorealizacja, poczucie autonomii, samoakceptacja, wydają się kluczowe dla każdego etapu życia dorosłego człowieka, również tego ostatniego – starości (Tobiasz-Adamczyk 2009).

Starość może być dobrym, satysfakcjonującym etapem życia nawet w obliczu świadomości zbliżającego się kresu. Wiele zależy od osobowości człowieka i jego nastawienia do otoczenia społecznego, uwzględniającego oczywiście wymienione wcześniej czynniki warunkujące sytuację życiową ludzi. Zgromadzone przez emerytowanych uczonych zasoby biograficzne i społeczne, czyli doświadczenie życiowe, wiedza, realizowanie się w dydaktyce i styczności z młodymi ludźmi, generalnie: szerokie kontakty i relacje społeczne z czasów własnej edukacji i pracy zawodowej, stwarzają szanse na optymistyczną i aktywną starość.

Literatura

- Adamczyk M.D., 2018, *Postrzeganie i stopień przygotowania do emerytury w opinii uczestników badania Ball – Be Active Through Lifelong Learning*, Roczniki Ekonomii i Zarządzania, nr 2, t. 10 (46), s. 177–193.
- Bonk E., Retowski S., 2013, *Emerytura – ulga czy udręka? Postrzeganie emerytury na przykładzie słuchaczy Uniwersytetów Trzeciego Wieku*, Gerontologia Polska, t. 21, nr 1, s. 25–31.

- Halicki J., 2006, *Spoleczne teorie starzenia się*, [w:] M. Halicka, J. Halicki (red.), *Zostać ślad na ziemi*, Wydawnictwo Uniwersytetu w Białymstoku, Białystok.
- Krzyżowski Ł., 2013, *Polscy migranci i ich starzejący się rodzice. Transnarodowy system opieki międzygeneracyjnej*, Wydawnictwo Naukowe Scholar, Warszawa.
- Nicpoń M., Marzęcki R., 2010, *Pogłębiony wywiad indywidualny w badaniach politologicznych*, [w:] D. Mikucka-Wójtowicz (red.), *Przeszłość – Teraźniejszość – Przyszłość. Problemy badawcze młodych politologów*, Wydawnictwo Libron – Filip Lehner, Kraków, s. 245–252.
- Tobiasz-Adamczyk B., 2009, *Teoretyczne wyznaczniki przemocy wobec osób starszych*, [w:] B. Tobiasz-Adamczyk (red.), *Przemoc wobec osób starszych*, Wydawnictwo Uniwersytetu Jagiellońskiego, Kraków, s. 15–18.
- Zalewska J., 2015, *Człowiek stary wobec zmiany kulturowej. Perspektywa teorii praktyk społecznych*, Wydawnictwo Naukowe Scholar, Warszawa.

Możliwości zastosowania iniekcji wykonywanych otworami wiertniczymi głębokimi w celu ograniczenia dopływu wód do podziemnych wyrobisk górniczych

Robert Rado 

AGH Akademia Górniczo-Hutnicza w Krakowie, Wydział Wiertnictwa, Nafty i Gazu, Kraków

Streszczenie: Jednym z niepożądanych zjawisk towarzyszących działalności górniczej jest powstawanie wtórnych zmian w górotworze w otoczeniu wyrobisk górniczych. Górotwór w miejscach prowadzenia eksploatacji najczęściej jest również zaburzony pierwotnymi dyslokacjami wynikającymi z procesów geologicznych zachodzących w czasie. Nałożenie się obu niepożądanych zjawisk prowadzi do różnego rodzaju komplikacji towarzyszących wydobywaniu kopalin. Jednym z takich zjawisk jest dopływ wód z górotworu do górniczych wyrobisk kopalnianych. Niekontrolowany dopływ wód do kopalni jest niebezpieczny z punktu widzenia: bezpieczeństwa prowadzenia eksploatacji i ochrony środowiska naturalnego. Odwadnianie kopalni wód wymaga nakładów finansowych oraz angażuje zasoby techniczne i ludzkie. W artykule przedstawiono prace nad ograniczeniem dopływu wód do wyrobisk górniczych kopalni rud miedzi. Do ograniczenia dopływu wód do wyrobisk kopalni zastosowano metody wiertnicze przy użyciu iniekcji otworami głębokimi. Do zredukowania przepuszczalności zaburzonego pierwotnie i wtórnie górotworu zastosowano iniektory na bazie materiałów mineralnych i odpadów pochodzących z przemysłu energetycznego. Zastosowane receptury zaczynów iniekcyjnych różniły się składem oraz czasem ich wiązania dobieranym w zależności od aktualnego stanu górotworu i rozwoju dopływu do wyrobisk kopalnianych.

Słowa kluczowe: dopływ wody do kopalni, wiercenie otworu wiertniczego, otwór iniekcyjny głęboki, zaczyny cementowe, iniektory do uszczelniania górotworu, receptury iniektów

POSSIBILITIES OF USING DEEP BOREHOLES INJECTION TO REDUCE WATER INFLOW INTO UNDERGROUND MINE EXCAVATIONS

Abstract: One of the unwanted effects of mining activities is the formation of secondary changes in the rock mass in the surroundings of the mine workings. The rock mass in the areas where mining is carried out is most often also affected by primary dislocations due to geological processes occurring over time. The combination of both undesirable effects leads to various complications accompanying the mining of minerals. One such occurrence is the inflow of water from the rock mass into the underground mine. Uncontrolled water inflow into mines is dangerous from the point of view of mining safety and environmental protection. The dewatering of mines requires financial investments and engagements of technical and human resources. The article presents efforts to reduce the water inflow into the mine workings of a copper ore mine. To reduce the inflow of water into the mine sites, drilling methods were applied by using deep borehole injection. To reduce the permeability of the primary and secondary disturbed rock mass, mineral-based slurries and the waste products from the energy industry were used. The injection slurry recipes used were different in composition and their setting time selected according to the current state of the rock mass and the evolution of the inflow to the mine workings.

Keywords: mine water inflow, borehole drilling, deep injection borehole, cement slurry, injectants for rock mass formation, injection recipes

1. Zarys budowy geologicznej rejonu wzmózonego dopływu wód do wyrobisk górniczych

Stan rozpoznania geologicznego rejonu, w którym występują wzmózone dopływy do wyrobisk górniczych, opiera się na wynikach badań z otworów głębokich oraz otworów dołowych. Wzmózone dopływy występują w rejonie złoża rud miedzi „Sieroszowice”.

Litostratygrafia

Litostratygraficznie rejon dopływu do wyrobisk górniczych zbudowany jest z utworów czwartorzędu wykształconego w postaci piasków średnio- i drobnoziarnistych oraz niżej położonych żwirów kwarcowych. Utwory te zalegają do głębokości około 55 m p.p.t. Czwartorzęd tworzą osady morenowe i rzeczno-lądowe. Są to utwory polodowcowe, gliny – moreny dennej i czołowej, oraz piaszczyste osady sandrów. Zazwyczaj występują grubo- i średnioziarniste piaski kwarcowe. Ponadto pojawiają się gliny, mułki, rzadziej żwiry.

Poniżej utworów czwartorzędowych zalegają osady neogenu i paleogenu (trzeciorzęd). Osady trzeciorzędowe zalegają niezgodnie na osadach triasu. Warstwy trzeciorzędowe obejmują pełny profil neogenu oraz górną część paleogenu.

Całkowita miąższość osadów neogenu (pliocenu i miocenu) w rejonie wzmózonego dopływu wód do wyrobisk kopalnianych waha się od 334 m do 411 m.

Osady pliocenu charakteryzują się zmienną sedymentacją i zostały wykształcone w postaci piasków i ilów. Natomiast miocen w górnej części składa się z dwóch różnych litologicznie zespołów warstw: ilów plastycznych oraz piasków i żwirów z kilkoma przewarstwieniami węgla brunatnego. W środkowej części miocen zbudowany jest głównie z piasków kwarcowych, żwirów kwarcowo-skaleniovych z przeławiczeniami ilów i mułków. Wśród tych osadów występują wkładki węgla brunatnego i niekiedy łu węglatego. W dolnej części miocen tworzą głównie utwory ilaste z wkładkami mułków, piasków i żwirów. W stropowej części miocenu dolnego występuje pokład węgla brunatnego.

Paleogen jest reprezentowany przez osady oligocenu. W górnej części profilu oligocenu występuje kilka warstw węgla brunatnego, ilów węglowych i węglistych, zaś w dalszej części profilu występują łu, piaski i mułki.

Poniżej warstw oligocenu zalega trias, który reprezentowany jest przez osady pstrego piaskowca dolnego oraz środkowego. Na obszarze wzmózonych dopływów do wyrobisk kopalnianych nie stwierdzono młodszych osadów triasu (triasu górnego). Dolny pstry piaskowiec zbudowany jest z piaskowców drobnoziarnistych, łupków ilastych i mułowców. Środkowy pstry piaskowiec to głównie drobno- i średnioziarniste piaskowce, a także mułowce i łupki ilaste. Miąższość triasu wynosi około 320 m.

Poniżej triasu zalega cechsztyń, o średniej miąższości około 250 m, reprezentowany przez cztery cyklotemy:

- Aller (PZ4) zbudowany z iłolupków z gniazdami i żyłkami gipsu i anhydrytu, anhydrytu pegmatytowego z wtrąceniami pelitu kwarcytowego i wkładek czerwonego piaskowca.
- Leine (PZ3) wykształcony w postaci anhydrytu głównego A3, iłolupka ciemnoszarego i zwięzłego dolomitu płytowego Ca3.
- Stassfurt (PZ2) zbudowany jest z anhydrytu podstawowego A2 laminowanego substancją ilastą. Poniżej zalega dolomit główny Ca2 wykształcony w postaci dolomitu mikrytowego zwięzłego. W utworach dolomitu głównego stwierdzono liczne spękania i ślady ługowania w postaci kawern. Lokalnie w dolomitach występują – w formie rozproszonej – domieszki minerałów ilastych oraz skupienia gipsu lub anhydrytu.
- Werra (PZ1), w którego stropowej części zalega anhydryt górny A1g zbudowany z mikrytowego, jasnoszarego, masywnego anhydrytu, w którym występują domieszki substancji dolomitowej, rzadziej ilastej. Poniżej anhydrytu wykształciła się sól kamienna Na1 grubokrystaliczna, barwy białej, przezroczysta, miejscami zanieczyszczona iłami i przerostami anhydrytu. Na obszarze wzmożonego dopływu wód występuje niemal na całej ich powierzchni z wyjątkiem niewielkiego fragmentu należącego do rozległej zatoki bezsolnej. Pod solą zalega anhydryt A1d (dolny) zbudowany z jasnych i ciemnoszarych anhydrytów krystalicznych. Anhydryty te zawierają domieszki substancji ilastej lub dolomitu. W najwyższych partiach anhydrytu dolnego lokalnie występuje kilkudziesięciocentymetrowa warstwa silnie zmienionych wpływami tektoniki iłów, z okruchami anhydrytu lub gipsu nosząca nazwę „iłu solnego”. W miejscach, gdzie stwierdza się brak soli, w stropie anhydrytu dolnego występuje brekcja ilasto-anhydrytowa (Markiewicz 2003, 2007). Najczęściej zbudowana jest ona z substancji ilastej, względnie ilasto-dolomitycznej, w której obrębie występują okruchy anhydrytu o średnicy od około 1 mm do kilku centymetrów. Poniżej anhydrytu dolnego A1d wykształcił się wapień cechsztyński Ca1 w postaci wapieni i dolomitów, w których profilach występują cztery zespoły warstw różniące się cechami litologicznymi. Najwyżej zalega warstwa wapienia cechsztyńskiego z domieszkami gipsu lub anhydrytu. Pod nią zalegają warstwy zawierające struktury oolitowe lub onkolitowe. W dalszej kolejności zalegają wapienie i dolomity ze szwami stylolitowymi wypełnionymi ciemnymi minerałami ilastymi. Natomiast najniżej znajdują się wapienie lub dolomity ilaste. W spągowej części wapienia cechsztyńskiego pojawia się okruszcowanie siarczkami miedzi. Ostatnim piętnem cyklotemu PZ1 jest łupek miedzionośny T1 reprezentowany przez łupki dolomityczne, łupki dolomityczno-ilaste oraz łupki ilasto-dolomityczne.

Tektonika

Obszar wzmożonego dopływu do wyrobisk górniczych znajduje się w strefie zaniku tektoniki nieciągłej, na południe od dużego zaburzenia tektonicznego – fleksury Jakubowa o amplitudzie szacowanej na około 50–70 m.

Najprawdopodobniej zaczątki fleksury powstały w orogenezie waryscyjskiej, a następnie uległa ona odnowieniu i rozwinięciu w młodszych osadach w orogenezie alpejskiej. W wyniku kompresji laramijskiej doszło do częściowego usunięcia soli z jej południowej części i powstania tzw. spawu tektonicznego (brekcja tektoniczna na kontakcie anhydrytów A1d i A1g), inaczej brekcji ilasto-anhydrytowej (BrA1) (Markiewicz 2007). Można z dużym prawdopodobieństwem przyjąć, że brekcja ta jest pozostałością po wyciśniętej soli.

Występowanie strefy Jakubowa kontynuującej się w stropie powyżej poziomu wyrobisk górniczych, a także w warstwach stropowych – głównie w Ca2 odrębnych (nie stwierdzanych na poziomie wyrobisk) zaburzeń geologicznych, w tym tektoniki nieciągłej, potwierdza także najnowsza interpretacja wykonanych na obszarach złóż rud miedzi, w tym także w analizowanej części złoża badań sejsmicznych (Leszczyński 2022). Na wszystkich przekrojach sejsmicznych przecinających fleksurę Jakubowa stwierdzono jej kontynuowanie się w stropie do utworów triasu.

Fleksura Jakubowa może być główną przyczyną dopływu wody do wyrobisk kopalnianych z uwagi na towarzyszący jej system spękań i szczelin, które kontynuują się nad stropem przestrzeni wyeksploatowanej i nałożyły się na system spękań poeksploatacyjnych. Z obserwacji służby geologicznej w wyrobiskach wynika, że w obrębie dolomitów Ca1 występują nasunięcia międzylawicowe oraz uskoki przesuwcze o biegu skośnym do strefy Jakubowa. Dyslokacje te (płaszczyzny nieciągłości nieobserwowane w stropie piaskowca) często mają granicę w dolomitach smugowanych (brekcja tektoniczna) lub łupkach miedzionośnych, które prawdopodobnie stanowiły pakiet skał, po których warstwy nadległe ulegały przesunięciom. Zasięg pionowy dyslokacji na obecnym etapie jest trudny do stwierdzenia.

Z mapy zalegania spagu dolomitu głównego Ca2 w rejonie, w którym rejestruje się największe dopływy do wyrobisk górniczych (Andrusikiewicz 2022), wynika duże zróżnicowanie rzędnych zalegania spagu Ca2 nawet na stosunkowo krótkich odcinkach, co sugeruje występowanie szeregu uskoków w poziomie Ca2 o amplitudach rzędu 10–40 m. Uskoki te mogły powstać na skutek nacisków tektonicznych w obrębie strefy Jakubowa, powodujących zjawisko halokinezy zachodzącej zachodzących pod wpływem ruchów mas solnych wywołanych ciśnieniem skał nadkładu w strefie Jakubowa – deformującej wyżej zalegające sztywne warstwy anhydrytów A1g i dolomitu głównego Ca2. Występowanie uskoków w poziomie Ca2 może mieć duże znaczenie w powstawaniu przebieg hydraulicznych z tego poziomu do wyrobisk.

Wieloletnie badania strukturalne w poziomie złoża rud miedzi sprawiły, że punktem odniesienia dla tektoniki pokładu najstarszej soli kamiennej (Na1) stał się model

tektoniki blokowo-uskokowej jej podłoża. W trakcie wielokrotnej przebudowy tektonicznej omawianego obszaru horyzont solny sprzyjał wygaszaniu uskoków w swoim bezpośrednim podłożu oraz prawdopodobnie generowaniu odrębnego układu strukturalnego górnego permu i mezozoiku w nadkładzie. Uskoki stanowiące kontynuację zuskokowania otoczenia pokładu najstarszej soli kamiennej (Na1) nie są obserwowane w jej obrębie. Wynika to z właściwości geomechanicznych soli. Ulega ona w takich warunkach deformacjom plastycznym, a jednocześnie amortyzuje zewnętrzne naprężenia tektoniczne (tensyjne i kompresyjne).

Warunki hydrogeologiczne w rejonie wzmożonego dopływu

Na obszarze złoża rud miedzi „Sieroszowice”, gdzie rejestruje się największe dopływy do wyrobisk górniczych, wyróżnia się dwa kompleksy hydrogeologiczne:

- kenozoiczny, obejmujący luźne utwory czwartorzędu i trzeciorzędu o miąższości do około 400–510 m o charakterze porowym,
- triasowo-permski, występujący w zwiezłych skałach pstrego piaskowca, cechsztynu i czerwonego spągowca o charakterze głównie szczelinowym i szczelinowo-krasowym.

Kenozoiczny kompleks wodonośny w rejonie analizowanych pól eksploatacyjnych stanowi rozległy zbiornik wód podziemnych o znaczeniu regionalnym i o dużej zmienności litologicznej. W kompleksie tym występują dwa piętra wodonośne: czwartorzędu Q i trzeciorzędu Tr, rozdzielone ciągłą serią ilów poznańskich o miąższości od 20 m do ponad 100 m. Iły te lokalnie mogą być rozcięte głębokimi rynnami erozyjnymi.

Wodonośny kompleks triasowo-permski obejmuje monoklinalnie zapadające oraz zaburzone tektonicznie serie skalne. Zawodnienie występuje w utworach węglanowych i klastycznych niekiedy o dużej porowatości, szczelinowatości i kawernistości, szczególnie w strefach dyslokacji. W kompleksie tym występują dwa piętra wodonośne triasu T i permu P. W utworach triasowych wyróżnia się poziom wapienia muszlowego oraz poziom pstrego piaskowca Tp, który dzieli się na trzy warstwy wodonośne Tp1, Tp2 i Tp3 o charakterze porowym i szczelinowo-porowym).

Triasowe piętro wodonośne reprezentowane jest w analizowanym rejonie przez dwie warstwy wodonośne poziomu wodonośnego pstrego piaskowca: warstwę środkowego (Tp2) i dolnego pstrego piaskowca (Tp1). Reprezentowane są przez drobno- i średnioziarniste piaskowce kwarcowe.

Kontakty hydrauliczne pomiędzy poszczególnymi piętrami wodonośnymi w obrębie złoża „Sieroszowice” w warunkach pierwotnych, tj. przed rozpoczęciem eksploatacji górniczej rud miedzi przez KGHM, występowały w obrębie tzw. okien hydrogeologicznych oraz przez większe naturalne strefy uskokowe. Strefy naturalnych kontaktów hydraulicznych znajdują się generalnie poza obszarem złoża „Sieroszowice”, głównie w rejonie podkenozoicznych wychodni, przy regionalnej strefie uskokowej środkowej

Odry. W obrębie analizowanej części złoża, gdzie występują dopływy, charakterystyczne jest rozdzielenie pięter i części poziomów wodonośnych seriami (warstwami) skalnymi o cechach izolacyjnych. Wszystko wskazuje na to, że lokalnie strefa izolacyjna jest zakłócona czynnikami naturalnymi (np. występowanie fleksury Jakubowa, uskoki) lub antropogenicznymi (wpływy eksploatacji górniczej) (Chrzanowska 2022).

Prowadzona działalność górnicza związana z eksploatacją złoża rudy miedzi spowodowała powstanie nowych, rozległych kontaktów hydraulicznych na skutek wpływów robót górniczych, przede wszystkim eksploatacyjnych.

W obrębie wszystkich złóż rud miedzi KGHM występuje lej depresji, który obejmuje większość pięter wodonośnych. Drenażem górniczym nie zostały objęte tylko najwyższe piętra wodonośne: czwartorzędowe oraz nadwęglowy poziom wodonośny trzeciorzędu.

Dla bezpiecznego prowadzenia robót górniczych duże znaczenie ma kontakt hydrauliczny pomiędzy poziomami przyłożowymi: wapienia podstawowego Ca1 i piaszczowców czerwonego spągowca z wyżej zalegającym poziomem dolomitu głównego Ca2. W normalnych warunkach górotworu nienaruszonego wpływami eksploatacji górniczej kontakt ten nie występuje. Wymienione powyżej poziomy wodonośne rozdzielają warstwy ewaporatów: głównie anhydrytów A1d i A1g oraz soli najstarszej Na1 o dostatecznie dużej miąższości.

Prowadzone rozpoznanie rejonu, w którym obserwuje się wzmożone dopływy otworami powierzchniowymi i dołowymi, potwierdza możliwość występowania kontaktów hydraulicznych pomiędzy poszczególnymi piętrami i poziomami wodonośnymi. Podczas wierceń otworów powierzchniowych zaobserwowano silne ucieczki płuczek na skutek spękań wywołanych wpływami eksploatacji w anhydrycie A3, kilkanaście metrów poniżej spagu triasu i kilkadziesiąt metrów powyżej stropu Ca2. Ucieczki te nasilają się w miarę zbliżania się do stropu Ca2. Pobrane do badań rdzenie wiertnicze wykazują intensywne spękanie. Podczas wierceń ujawniły się wpływy tektoniki nadsolnej, szczególnie w odcinku łożysk cyklotemu PZ4, gdzie stwierdzono przesunięcia warstw, a także występowanie brekcji. Potencjalnymi strefami podwyższonej chłonności mogą być uskoki stwierdzane w triasie oraz na pograniczu dolomitu Ca3 i anhydrytu A2.

2. Mechanizm dopływu wód do wyrobisk kopalnianych

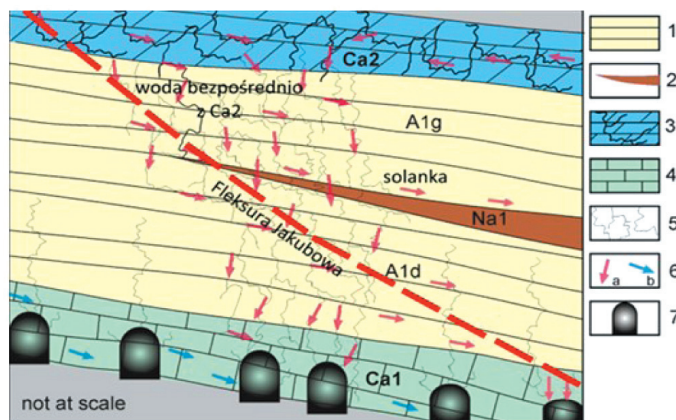
Dopływy wód do wyrobisk kopalnianych analizowanego rejonu występują od ponad dwudziestu lat. W latach 2002–2019 notowano niewielkie (do $1,5 \text{ m}^3/\text{min}$) dopływy pełno nasyconej solanki. W roku 2019 nastąpiły pierwsze dopływy o zwiększonym strumieniu objętości około $13 \text{ m}^3/\text{min}$, który następnie zmniejszył się do $5 \text{ m}^3/\text{min}$ i utrzymywał się w tym zakresie od maja 2020 r. do sierpnia 2021 r. W trzecim kwartale 2021 r. nastąpił ponowny gwałtowny wzrost dopływu do około $11 \text{ m}^3/\text{min}$, który stale rósł, by osiągnąć około $35 \text{ m}^3/\text{min}$ na koniec czerwca 2023 r., a następnie $43 \text{ m}^3/\text{min}$ na początku 2024 r.

Najbardziej prawdopodobnymi źródłami dopływu solanki jest jej nagromadzenie w połączonych hydraulicznie poziomach Ca2 oraz anhydrytach A1g. Przebicie hydrauliczne i wzmożony dopływ do wyrobisk nastąpił na skutek równoczesnego wystąpienia kilku niekorzystnych czynników:

- silnego zawodnienia warstwy Ca2 oraz wysokiego współczynnika filtracji tej warstwy,
- występowania lokalnego braku soli kamiennej jako warstwy izolującej,
- występowania strefy tektonicznej Jakubowa przecinającej górotwór od utworów triasu do poziomu wyrobisk górniczych, która zwiększa kontakty hydrauliczne triasu i dolomitu głównego Ca2 z wyrobiskami górniczymi,
- występowania drobnych uskoków powyżej pokładu soli,
- naruszonych prowadzoną eksploatacją warstw dolomitu Ca2 oraz anhydrytu A1g,
- powstania poziomych naprężeń rozciągających w górotworze na granicy pól, w których zakończono eksploatację.

Wzrost dopływu wód z górotworu do wyrobisk jest najprawdopodobniej również spowodowany bezpośrednio dopływającymi wodami z Ca2 (niewykluczone, że także z triasu) przez kontakty hydrauliczne uaktywniane niskoenergetycznymi wstrząsami górotworu.

Na rysunku koncepcyjnym (Kotarba 2018–2022) przedstawiono mechanizm zasilania wyrobisk górniczych wodami z górotworu (rys. 1). Widoczny jest na nim rejon wyklinowania soli związany w analizowanym rejonie dopływu wraz z przebiegiem strefy tektonicznej Jakubowa oraz powstałymi szczelinami i spękaniami poeksploatacyjnymi sięgającymi do Ca2 i wyżej do triasu. Zaprezentowany układ jest najprawdopodobniejszą przyczyną przebicia hydraulicznego i zasilania wyrobisk górniczych.



Rys. 1. Model koncepcyjny przebicia hydraulicznego w rejonie zaniku soli
 1 – anhydryt, 2 – sól kamienna, 3 – dolomit główny Ca2, 4 – wapień cechsztyński Ca1,
 5 – spękania i szczeliny poprzeczne wywołane działalnością górniczą,
 6 – kierunek przepływu wody w poziomie Ca2 i poprzez anhydryty A1g, A1d i soli Na1 (a)
 i w poziomie Ca1 (b), 7 – wyrobisko górnicze

Źródło: Kotarba (2018–2022)

Obserwowany dopływ wody do wyrobisk górniczych pochodzi przede wszystkim z rozległego systemu zeszczelinowanego dyslokacjami i spękanego pod wpływem eksploatacji górotworu, w którym powstał „zbiornik” o bardzo dużej pojemności z nieograniczoną swobodą przemieszczania się zakumulowanej wody. Zbiornik ten jest w sposób ciągły zasilany bocznie dopływem dynamicznym z poziomu dolomitu głównego Ca2 i przypuszczalnie także z piętra triasowego szczególnie w strefie zaburzenia tektonicznego – fleksury Jakubowa. Nagromadzona w „zbiorniku” solanka przelewa się do wyrobisk przez spękania i dyslokacje, rozmywając krawędź pokładu soli od strony luki bezsolnej. Przepływająca woda powoduje ługowanie pokładu soli, co wywołuje wstrząsy i udrażnianie nowych kontaktów hydraulicznych.

3. Możliwość ograniczenia dopływu wód do wyrobisk kopalnianych z użyciem otworów wiertniczych iniekcyjnych wierconych z powierzchni

Ograniczenie dopływu wód do wyrobisk kopalnianych jest zagadnieniem złożonym i technicznie trudnym do wykonania. Pełne uszczelnienie i wypełnienie iniektami górotworu na całym obszarze, gdzie prowadzono eksploatację, jest praktycznie niemożliwe, a środki i czas poświęcony na takie przedsięwzięcie bardzo trudne do oszacowania. Dlatego też jednym z rozwiązań akceptowalnych czasowo i finansowo jest zbudowanie bariery przeciwiłtracyjnej. Jej zadaniem jest zmniejszenie objętości szczelin w górotworze i zablokowanie przepływu solanki przez krawędź soli na granicy luki bezsolnej, a następnie migracji solanki do wyrobisk górniczych. Zapobiegnie to również dalszemu rozmywaniu i ługowaniu pokładu soli kamiennnej. Stworzenie bariery przeciwiłtracyjnej dla ograniczenia przepływu wody polega na „postawieniu” jej na warstwie soli, która jest nieprzepuszczalna.

Idea utworzenia bariery przeciwiłtracyjnej opiera się na założeniu, że woda z połączonych hydraulicznie poziomów dolomitu Ca2 i anhydrytu A1g przepływa ponad stropem soli, powodując jej ługowanie, a następnie wpływa spękaniem w rejonie pozabawionym soli, systemem spękań poeksploatacyjnych do anhydrytów dolnych A1d (podsolnych), ługując pokład soli także od strony jego spągu. Następnie woda płynie grawitacyjnie rozwarstwieniami w anhydrytach dolnych A1d i zasila wyrobiska górnicze znajdujące się pod tymi anhydrytami.

Bariera przeciwiłtracyjna będzie utworzona przez sieć wiertniczych otworów głębokich wierconych z powierzchni, przez które do górotworu będzie zatłaczany uszczelniający zaczyn iniekcyjny. Utworzona bariera z zaczynu uszczelniającego w pionie obejmie swoim zasięgiem zeszczelinowany górotwór poniżej spągu triasu i powyżej

stropu soli kamiennej Na1. Bariera będzie się opierała na stropie nieprzepuszczalnego dla wody pokładu soli Na1, uniemożliwiając przepływ wód w kierunku obszaru bez soli i dalej do wyrobisk górniczych. Dlatego zaprojektowane otwory iniekcyjne w pierwszej kolejności zostaną rozmieszczone wzdłuż krawędzi występowania pokładu soli.

4. Dobór zaczynów uszczelniających do prac iniekcyjnych oraz technika iniekcji otworowej w strefie dopływu wód do wyrobisk kopalnianych

Prace wiertniczo-iniekcyjne pozwalające na osiągnięcie założonego celu w postaci stworzenia bariery przeciwfiltracyjnej realizowane będą metodami iniekcji otworowych z zastosowaniem odpowiednio dobranych zaczynów na bazie składników mineralnych i niemineralnych. Projektowanie prac iniekcyjnych przy użyciu otworów wiertniczych głębokich nastręcza problemów geotechnicznych związanych z jakością uszczelnienia górotworu, ciśnieniami w nim panującymi oraz ciśnieniem w otworze iniekcyjnym w trakcie prowadzenia iniekcji. Prowadzenie iniekcji z powierzchni jest również związane z możliwością pojawienia się komplikacji wiertniczych. W przypadku zatłaczania dużych objętości iniektów wyzwaniem jest także przygotowanie techniczne i logistyczne iniekcji, co przekłada się na koszty prowadzenia iniekcji.

Dla zapewnienia wysokiej skuteczności prac iniekcyjnych stosowane do iniekcji zaczyny uszczelniające muszą spełniać równocześnie kilka kryteriów.

Pierwszym z nich jest warunek zgodności pod względem fizykochemicznym z uszczelnianym górotworem. Drugi warunek wynika z kryterium czasu przetłaczania zaczynu, który pozwoli na jego skuteczne przemieszczenie w układzie wytwarzania iniektu, a następnie w górotworze. Trzecim wymogiem jest potrzeba zapewnienia odpowiednich parametrów wytrzymałościowych oraz odporności korozyjnej (trwałości) stwardniałych zaczynów uszczelniających. Receptury zaczynów powinny być tak dobrane, by stwardniały zaczyn miał parametry geomechaniczne takie same lub porównywalne z właściwościami uszczelnianego górotworu, zapewniając jego stabilność i konsolidację. Czwarty warunek powinien uwzględniać czynnik ekonomiczno-ekologiczny (Stryczek 2009).

Z uwagi na czynniki ekonomiczno-technologiczne zastosowanie do utworzenia bariery przeciwfiltracyjnej zaczynów iniekujących sporządzanych wyłącznie na osnowie cementów portlandzkich nie jest korzystne, ponieważ wykazują one wady, np. w zakresie ich reologii, czasów wiązania czy odporności na korozję, a także są kosztowne. Niekorzystne właściwości użytkowe zaczynów uszczelniających sporządzanych na osnowie cementów powszechnego użytku można poprawić, wprowadzając do składu receptur odpowiednio dobrane dodatki mineralne oraz domieszki.

Wykorzystanie różnego rodzaju dodatków do sporządzania zaczynów uszczelniających wpływa na:

- polepszanie ich parametrów technologicznych,
- zmniejszanie kosztów zaczynu iniekującego,
- utylizację materiałów odpadowych, a w konsekwencji na zmniejszenie degradacji środowiska naturalnego.

Na potrzeby stworzenia bariery przeciwfiltracyjnej z użyciem powierzchniowych otworów iniekujących i zmniejszenia dopływu wód do wyrobisk górniczych opracowano i przebadano receptury zaczynów uszczelniających o zwiększonej trwałości na podstawie geopolimerów. Receptury oparto na składnikach pochodzenia nieorganicznego, a dokładnie pucolanowego materiału powstałego:

- ze spalania węgla brunatnego w palenisku pyłowym,
- ze spalania węgla brunatnego w palenisku fluidalnym,
- z mielonego granulowanego żużla pomiedziowego,
- z odpadu poflotacyjnego z procesu wzbogacania rud miedzi.

Popiół lotny zaliczany jest do dodatków o właściwościach pucolanowych, natomiast mielony granulowany żużel pomiedziowy oraz odpad poflotacyjny charakteryzuje się aktywnością pucolanowo-hydrauliczną.

Badania laboratoryjne związane z doбором receptur oraz parametrów technologicznych zaczynów do prac iniekcyjnych w otworach głębokich w strefie dopływu wód do wyrobisk podziemnych przeprowadzono na podstawie norm dotyczących składu i wymagań dla cementów, metod badań cementów, a w szczególności czasu wiązania i ich reologii.

Przeprowadzone badania miały na celu określenie przydatności różnego rodzaju dodatków pochodzenia nieorganicznego do zastosowania ich jako spoiw hydraulicznych w zaczynach uszczelniających nowej generacji o zwiększonej trwałości do zastosowania przy projektowaniu prac iniekcyjnych w strefie dopływu wód do wyrobisk podziemnych. Badania zmierzały do opracowania najbardziej efektywnych technicznie i ekonomicznie receptur.

Uzyskane wyniki badań laboratoryjnych

Do przygotowania zaczynów iniekcyjnych uszczelniających wykorzystano receptury na podstawie popiołów:

- z fluidalnego spalania węgla brunatnego z elektrowni „Turów”,
- z pyłowego kotła spalania węgla brunatnego z elektrowni „Bełchatów”.

W tabelach 1–3 zestawiono wstępnie badane receptury oraz ich niektóre parametry technologiczne w zależności od stosowanych dodatków (cement portlandzki, ścierniwo, odpady z odsiarczania gazów odlotowych, odpady poflotacyjne).

Tabela 1
Zestawienie podstawowych parametrów wstępnych receptury zaczynów uszczelniających
możliwych do zastosowania podczas iniekcji w otworach iniekcyjnych

Lp.	Oznaczenie receptury zaczynu uszczelniającego	Receptura zaczynu uszczelniającego							Współczynnik wodno-mieszaniowy w/m [-]	Rozlewność wg AzNI [mm]	Czas wiązania	
		ciecz zarobowa Solanka [cm ³]	cement portlandzki CEM I 42,5 [dag]	popiół z fluidalnego spalania węgla brunatnego w elektrowni Turów [dag]	popioły z pyłowego koka zespalandia węgla brunatnego z elektrowni Belchatów [dag]	ścierniwo [dag]	odpady z odsiarczania gazów odlotowych [dag]	odpady poflotacyjne w postaci suchej [dag]			początek [h]	początek [h]
1	2	3	5	4	6	7	8	9	10	11	12	
1	1	700	-	-	70	20	10	-	0,70	-	30	38
2	2	700	-	-	60	20	20	-	0,70	70	18	27
3	3	700	-	-	50	30	20	-	0,70	140	20	30
4	4	700	-	-	50	20	30	-	0,70	60	16	24
5	5	700	15	-	60	15	10	-	0,70	180	32	48
6	6	770	-	-	75	10	15	-	0,70	175	28	54
7	7	750	-	-	70	15	15	-	0,70	180	32	56
8	8	720	-	-	65	15	10	10	0,70	190	brak wiązania po 60 h	
9	9	650	30	-	60	10	-	-	0,65	-	0,5	1,0
10	10	600	30	-	40	20	10	-	0,60	-	17	21
11	11	900	10	-	70	15	-	-	0,90	165	10	12
12	12	500	-	70	-	20	10	-	0,50	240	10	12
13	13	500	-	60	-	30	10	-	0,50	240	17	20
14	14	700	-	-	60	20	10	10	0,70	180	30	42
15	15	500	-	60	-	20	10	10	0,50	230	brak wiązania po 54 h	
16	16	500	10	60	-	20	10	-	0,50	220	24	36
17	17	500	-	60	-	20	20	-	0,50	80	48	60
18	18	500	-	50	-	30	20	-	0,50	125	48	60
19	19	550	15	60	-	10	15	-	0,55	210	12	24
20	20	610	-	65	-	20	15	-	0,60	210	brak wiązania po 60 h	
21	21	600	-	60	-	15	15	10	0,60	195	brak wiązania po 60 h	

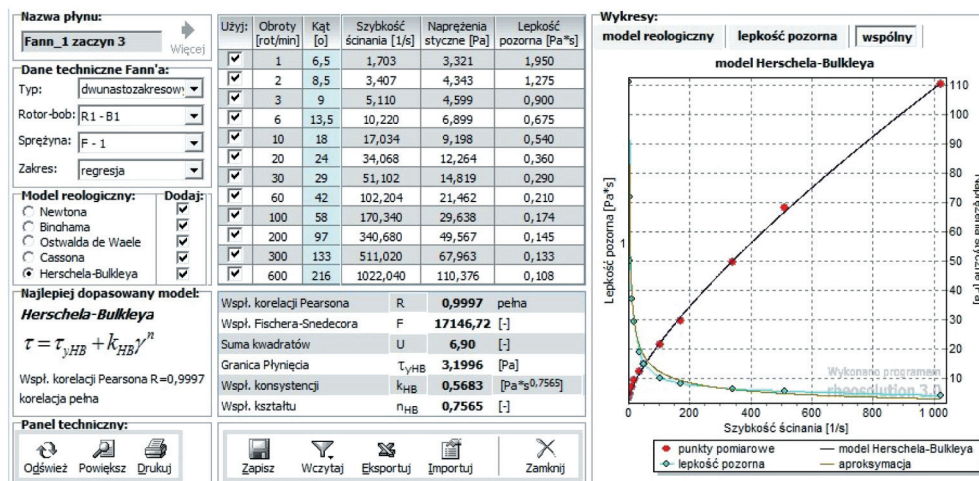
Tabela 2
Receptury oraz niektóre parametry technologiczne zaczynów uszczelniających określone laboratoryjnie w temperaturze 20°C (±2°C)
(popiół z elektrowni „Turów”)

Lp.	Oznaczenie receptury zaczynu uszczelniającego						Receptura zaczynu uszczelniającego w przeliczeniu na 1 kg składników stałych				Współczynnik wodno-mieszaniowy w/m [-]		Gęstość [kg/m ³]		Rozlewność według stożka AzNII [mm]	Kubek Forda 4 [s]	Czas wiązania	
							cięż zarobowa solanka [cm ³]	cement portlandzki CEM I 42,5 [dag]	popiół z fluidalnego spalania węgla brunatnego z elektrowni Turów [dag]	scierniwo [dag]	odpady z odsiarczania gazów odlotowych [dag]	odpady poftalacyjne w postaci suchej [dag]	zmierzona obliczona				początek [h]	poniec [h]
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15				
1	1	500	-	100	-	-	-	0,5	1530	1690	245	17	5 dni	-				
2	2	500	10	90	-	-	-	0,5	1560	1704	230	24	22	25				
3	3	500	-	90	-	10	-	0,5	1550	1676	190	50	45	5 dni				
4	4	500	-	85	-	15	-	0,5	1560	1668	135	30	32	42				
5	5	500	-	80	10	10	-	0,5	1560	1682	210	30	40	5 dni				
6	6	500	-	70	20	10	-	0,5	1590	1687	230	20	40	5 dni				
7	7	500	-	60	30	10	-	0,5	1600	1693	250	50	40	5 dni				
8	8	500	10	80	-	10	-	0,5	1580	1689	190	46	18	20				
9	9	500	10	70	10	10	-	0,5	1610	1695	210	30	18	24				
10	10	500	10	60	20	10	-	0,5	1630	1701	230	24	25	28				
11	11	500	-	70	20	10	-	0,5	1671	1695	240	22	10	12				
12	12	500	-	60	20	10	10	0,5	1685	1690	230	24	65	5 dni				

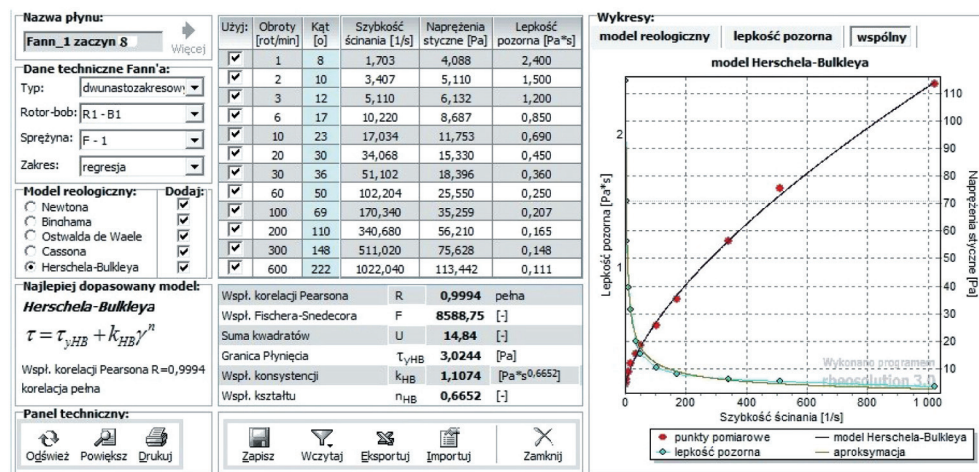
Tabela 3
Parametry technologiczne zaczynów uszczelniających określane laboratoryjnie w temperaturze 20° (±2°C)

Lp.	Oznaczenie receptury zaczynu uszczelniającego	Współczynnik wodno-mieszaninowy [-]	Gęstość [kg/m ³]	Rozlewność wg stożka AzNII [mm]	Lepkość względna wg Kubka Forda nr 4 [s]	Odstój [%]	Lepkość plastyczna η_p [Pa·s]	Lepkość pozoma η_a przy 600 obr./min [Pa·s]	Granica płynięcia τ_y [Pa]
1	2	3	4	5	6	7	9	10	11
1	1	0,55	1530	245	17	3	0,0506	0,0532	1,691
2	2	0,55	1560	230	24	5	0,0707	0,072	4,006
3	3	0,55	1550	190	50	1	0,1060	0,108	7,826
4	4	0,55	1560	135	30	0	0,1706	0,185	10,119
5	5	0,55	1560	210	30	0	–	–	–
6	6	0,55	1590	230	20	0	–	–	–
7	7	0,55	1600	250	50	0	–	–	–
8	8	0,55	1580	190	46	0	0,1092	0,111	10,657
9	9	0,55	1610	210	30	0	–	–	–
10	10	0,55	1630	230	21	0	–	–	–
11	11	0,55	1651	240	20	0	–	–	–
12	12	0,55	1700	230	52	0	–	–	–

Na rysunkach 2 i 3 przedstawiono przykładowe reologiczne krzywe płynięcia dla niektórych receptur badanych zaczynów uszczelniających. Badania reologiczne były wykonywane jedynie dla zaczynów, które w swym składzie nie zawierały ścierniwa ze względu na możliwość szybkiego zużycia elementów roboczych aparatury pomiarowej.



Rys. 2. Parametry reologiczne zaczynu nr 3



Rys. 3. Parametry reologiczne zaczynu nr 8

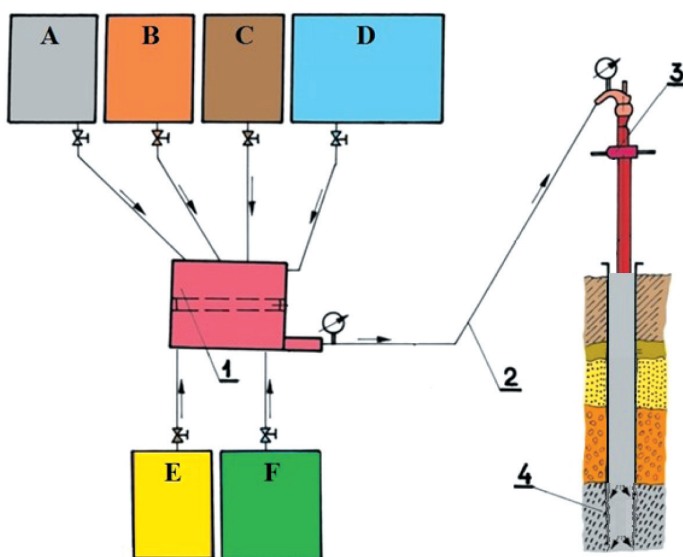
Sposób wytwarzania i zatłaczania mieszaniny iniekcijnej

Iniekt w postaci cieczy iniekującej będzie zatłaczany do górotworu przy wykorzystaniu otworów wiertniczych głębokich. Zatłaczanie cieczy iniekcyjnej ma za zadanie uszczelnienie górotworu w miejscach jego podwyższonej chłonności, czyli miejscach porowatych, spękanych bądź nieciągłych. Celem iniekcji będzie wypełnienie uprzednio wymienionych przestrzeni w górotworze, przez co zostanie zablokowana bądź ograni-

czona migracja wód do wyrobisk kopalnianych. Podczas zatłaczania iniektu do górotworu, dodatkowo w celu zwiększenia objętości zaczynu i regulacji własności mechanicznych do mieszaniny bazowej składającej się z solanki i cementu portlandzkiego, okresowo lub w sposób ciągły będzie dodawany popiół lotny ze spalania węgla brunatnego oraz materiały uzupełniające w postaci pochodnych żużli z procesu metalurgicznego wytopu miedzi oraz odpady poflotacyjne. Do regulacji czasu wiązania zatłaczanej cieczy iniekcyjnej okresowo może być użyty również chlorek wapnia CaCl_2 lub węglan sodu Na_2CO_3 w połączeniu ze stosowanym cementem portlandzkim. W celu ułatwienia przetłaczania iniektu przez otwór wiertniczy i górotwór oraz redukcji współczynnika wodno-mieszaninowego okresowo stosowane będą również plastyfikatory.

Mieszanina przeznaczona do iniekcji będzie wytwarzana w sposób ciągły na wiertni przez mieszanie poszczególnych składników wchodzących w skład iniektów i ich homogenizowanie w mieszaninie, a następnie przetłaczania zawiesiny iniekcyjnej do otworu wiertniczego.

Ogólny schemat ideowy układu technologicznego do przygotowania mieszaniny iniekcyjnej i jej zatłaczania przedstawiono na rysunku 3. Widoczny na nim ciąg technologiczny składa się z układu zasobników i silosów, które stanowią układ buforowo-magazynowy dla materiałów wykorzystywanych do przygotowania iniektów.



Rys. 4. Schemat układu gravitacyjnego zatłaczania zaczynu uszczelniającego w strefę chłonną górotworu

A – zbiornik na dodatek wchodzący w skład receptury zaczynu (popiół lotny z elektrowni „Turów”), B – zbiornik na dodatek wchodzący w skład receptury zaczynu (popiół lotny z elektrowni „Bełchatów”), C – zbiornik na spoiwo hydrauliczne (cement), D – zbiornik na ciecz zarobową (solanka), E – zbiornik na dodatek wchodzący w skład receptury zaczynu (ścielniwo), F – zbiornik na dodatek wchodzący w skład receptury zaczynu (odpad poflotacyjny), 1 – mieszalnik do sporządzania zaczynu uszczelniającego według ustalonej receptury oraz pompa do jego zatłaczania do otworu iniekcyjnego, 2 – przewód tłoczny do zatłaczania zaczynu uszczelniającego do otworu wiertniczego głębokiego, 3 – głowica do na wylocie otworu wiertniczego lub prewenter, 4 – strefa iniekcyjna (strefa chłonna górotworu)

Układ ten jest zasilany w sposób ciągły przez transport kołowy. Z układu zasobników i silosów materiały sytkie do wytwarzania mieszaniny iniekcyjnej są pobierane rurociągami transportowymi, a następnie przemieszczane do układu mieszającego w odpowiednich proporcjach wagowych i/lub objętościowych zgodnych ze stosowaną recepturą zaczynu uszczelniającego podczas iniekcji. Układ mieszający jest zasilany solanką pochodzącą z odwadniania wyrobisk górniczych. Bazowa mieszanina iniekcyjna w zależności od chłonności górotworu, oporów przepływu iniektu oraz ciśnienia tłoczenia jest uzupełniana dodatkami wypełniającymi oraz regulującymi reologię iniektów oraz czas ich wiązania.

5. Wnioski

Po przeprowadzeniu analiz czynników wpływających na wzmożony dopływ do wyrobisk kopalnianych oraz możliwości ograniczenia tego dopływu iniekcjami z otworów wiertniczych odwierconych z powierzchni można sformułować następujące wnioski:

1. Prowadzenie iniekcji uszczelniającej górotwór na całym obszarze oddziaływania eksploatacji górniczej oraz znajdujących się w górotworze pierwotnych zaburzeń tektonicznych nie jest możliwe z technicznego i ekonomicznego punktu widzenia ze względu na objętość pustek w górotworze w rejonie wzmożonego dopływu wód oraz możliwy zasięg iniekcji otworami powierzchniowymi.
2. Prace iniekcyjne powinno się prowadzić w obszarach, które najskuteczniej ograniczą strumień dopływu wód do wyrobisk kopalnianych przez zmniejszenie przepuszczalności górotworu i/lub wypełnienie pierwotnych oraz wtórnych zaburzeń górotworu.
3. Uszczelnienie górotworu otworami wierconymi z powierzchni należy prowadzić etapami poniżej utworów triasu, iniekując do utraty chłonności kolejne udostępniane interwały do osiągnięcia stropu soli kamiennej.
4. Przeprowadzone analizy wykazały, że przygotowanie iniektów wyłącznie na popiołach lotnych bez udziału cementu portlandzkiego nie jest możliwe ze względu na czas wiązania tak przygotowanych zaczynów iniekujących.
5. Badania zaczynów sporządzanych na podstawie popiołów z elektrowni „Bełchatów” wskazały, że wymagają one stosowania znacznie większych współczynników wodno-mieszaninowych w stosunku do zaczynów przygotowanych na podstawie popiołów z elektrowni „Turów”, co wydłuża czasy wiązania tych zaczynów.
6. Receptury bazujące na popiołach z elektrowni „Bełchatów” wymagają większej zawartości cementu, aby uzyskać podobny czas wiązania oraz wytrzymałość mechaniczną jak zaczyny bazujące na popiołach z elektrowni „Turów”.

7. Ze względów logistycznych (odległość do miejsca prowadzenia iniekcji) należy aplikować przede wszystkim popioły z elektrowni „Turów”, co przełoży się na obniżenie kosztów materiałowych wytworzenia iniektów.
8. Dodawanie materiałów zwiększających objętość zaczynów iniekujących (żużel pomiedziowy, materiał poflotacyjny) nie wpływa w sposób statystycznie istotny na wydłużenie czasów wiązania iniektów.

Literatura

- Andrusikiewicz W., Wątor L., 2022, *Ocena warunków geologicznych i hydrogeologicznych w rejonie pól SI-XV/7, SI-XV/8 i GA-I/6 oddziału G-61, rejonu GG-6 w O/ZG „Polkowice – Sieroszowice”, w aspekcie bezpiecznego prowadzenia robót eksploatacyjnych z uwagi na zagrożenie wodne*, Stowarzyszenie Naukowe im. S. Staszica, Kraków [praca niepublikowana].
- Chrzanowska A., Wątor L., 2022, *Analiza MES zachowania się górotworu i powierzchni terenu na skutek zmian warunków hydrogeologicznych i zjawisk ługowania soli wywołanych eksploatacją w rejonie SG O/ZG „Polkowice-Sieroszowice*, Stowarzyszenie Naukowe im. S. Staszica, Kraków [praca niepublikowana].
- Kotarba M., Olchowy P., Jeż P., 2018–2022, *Badania geochemiczne, mineralogiczne i mikrobialne w celu ustalenia źródła pochodzenia siarkowodoru i węglowodorów gazowych oraz próba wypracowania wskaźników zagrożeń związanych z ich występowaniem w złożu kopalń „Polkowice- Sieroszowice” i „Rudna”. Etapy I–V*, Akademia Górniczo-Hutnicza im. Staszica, Kraków [materiały wewnętrzne KGHM].
- Leszczyński R., 2022, *Interpretacja badań sejsmicznych wykonanych na obszarach złóż rud miedzi w latach 2011– 2014* [materiały wewnętrzne KGHM].
- Markiewicz A., 2003, *Tektonika cechsztyńskiej soli kamiennej w LGOM i jej znaczenie dla działalności gospodarczej*, Praca doktorska, Akademia Górniczo-Hutnicza im. Staszica, Zakład Złóż Rud i Soli, AGH (archiwum), Kraków.
- Markiewicz A., 2007, *Tektonika obszaru złoża*, [w:] A. Piestrzyński (red.), *Monografia KGHM Polska Miedź S.A.*, KGHM Cuprum, Lubin.
- Stryczek S., Gonet A., Wiśniowski R., Biskup T., 2009, *Wpływ pyłów cementowych z cementowni Chełm na właściwości technologiczne zaczynów uszczelniających*, Wiertnictwo, Nafta, Gaz 2009, t. 26, z. 4, s. 677–687.

Budowa analogowego efektu audio sterowanego biosygnalami

Filip Węgrzyn 

AGH Akademia Górniczo-Hutnicza, Wydział Inżynierii Mechanicznej i Robotyki, Kraków

Streszczenie: W pracy przedstawiono opis budowy analogowego efektu audio wykorzystującego biosygnaly zarejestrowane na skórze głowy człowieka do modulacji dźwięku. W zakres biosygnali wchodziły fale elektroencefalograficzne zawężone do pasma fal mózgowych alfa, a także elektrookulograficzne zawierające się w tym samym paśmie. Wybrany został efekt typu *phaser* modyfikujący sygnały wejściowe w wyniku zmiany częstotliwości środkowej filtrów pasmowo-zaporowych. Urządzenie skonstruowano tak, by funkcjonowało w dwóch trybach. W pierwszym z nich fale EEG (elektroencefalograficzne) i EOG (elektrookulograficzne) były wykorzystywane bezpośrednio do sterowania filtrami wpływającymi na dźwięk. W drugim – modulacja odbywała się z wykorzystaniem sygnału trójkątnego uzyskanego z generatora przestrajanego napięciem, na którego wejście podano obwiednię zarejestrowanych fal. Efekt został przetestowany podczas badania elektroencefalografem, zaś stopień kontroli użytkownika nad jego parametrami został określony podczas analizy uzyskanych spektrogramów.

Słowa kluczowe: efekt audio, modulacja, elektroencefalografia, biosygnaly, fale mózgowe

CONSTRUCTION OF AN ANALOG AUDIO EFFECT CONTROLLED BY BIOSIGNALS

Abstract: The paper presents a description of the construction of an analog audio effect using biosignals recorded from the human scalp to modulate sound. The biosignals included electroencephalographic waves narrowed to the Alpha brainwave band, as well as electrooculographic waves within the same band. A phaser effect was chosen, which modifies input signals based on changing the center frequency of notch filters. The device was designed to operate in two modes. In the first mode, EEG (electroencephalographic) and EOG (electrooculographic) waves were directly used to control the filters affecting the sound. In the second mode, modulation was carried out using a triangular signal obtained from a voltage-controlled oscillator, to which the envelope of the recorded waves was applied. The effect was tested during an electroencephalograph examination, and the degree of user control over its parameters was determined through the analysis of the obtained spectrograms.

Keywords: audio effect, modulation, electroencephalography, biosignals, brain waves

https://doi.org/10.7494/978-83-68219-20-3_7

1. Wstęp

Od wielu dziesięcioleci naukowcy z całego świata badali możliwości kontrolowania technologii za pomocą biosygnarów generowanych przez ludzki organizm. Próby stworzenia interfejsu mózg–komputer rozpoczęły się już w latach osiemdziesiątych XX wieku (Vidal 1973), a pierwsze odkrycia związane z rejestracją fal mózgowych z powierzchni skóry głowy sięgają lat trzydziestych, kiedy Hans Berger, niemiecki neurolog, użył zwykłego sprzętu radiowego do wzmocnienia elektrycznej aktywności mózgowej zarejestrowanej na skórze głowy człowieka. Ogłosił on, że słabe prądy elektryczne generowane w mózgu mogą zostać zmierzone bez fizycznego otwierania czaszki. Odkrycie Bergera zapoczątkowało wiele z dzisiejszych zastosowań elektroencefalografii. Uznaje się, że Hans Berger jest twórcą określenia „elektroencefalogram” opisującego przebieg elektrycznych potencjałów w ludzkim mózgu (Teplan 2002). Dekadę później opublikowano pierwszy artykuł opisujący koncept „ludzkich fal mózgowych” oraz identyfikujący regularne oscylacje w przedziale od 10 Hz do 12 Hz, które nazwane zostały „rytmem alfa” (Adrian i Matthews 1934).

Biosygnaly znalazły zastosowanie nie tylko w medycynie, ale również w muzyce. Polski kompozytor Krzysztof Penderecki wykorzystał zapis fal EEG pacjentów słuchających jego utworu *Tren – Ofiarom Hiroszimy* (1961) do stworzenia notacji muzycznej dzieła *Polymorphia* (1963) (Paalasmaa i in. 2012). Z kolei Alvin Lucier w utworze *Music for Solo Performer* (1965) jako pierwszy użył biosygnarów w czasie rzeczywistym podczas koncertu na żywo (Straebel i Thoben 2014).

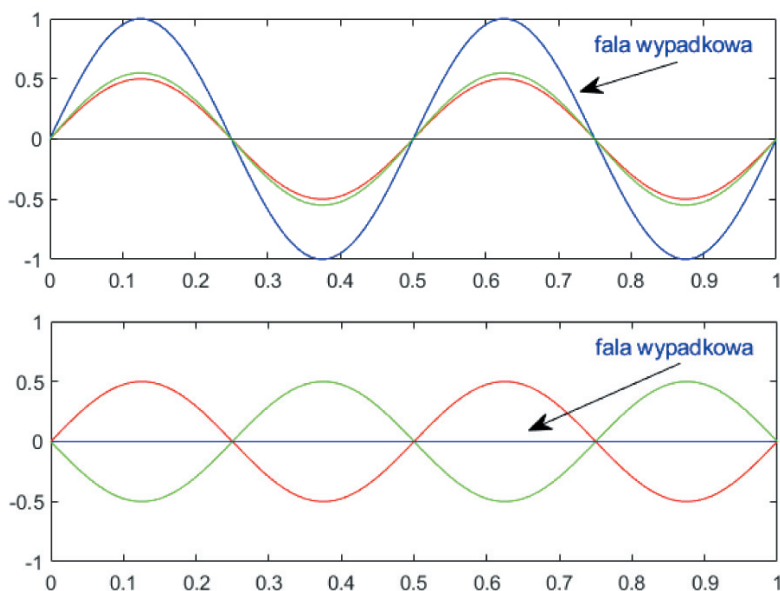
Efekty modulacyjne, powszechnie stosowane przez gitarzystów, służą do modyfikowania dźwięku i charakteryzują się takimi parametrami jak prędkość i głębokość modulacji (Zölzer 2011). Zazwyczaj kontrola tych parametrów odbywa się ręcznie, co powoduje, że brzmienie efektu pozostaje niezmiennie przez większość trwania utworu. W przypadku możliwości kontroli parametrów przez biosygnaly użytkownik mógłby w dowolny sposób modyfikować brzmienie wybranych efektów bez konieczności ręcznego zmieniania ich wartości. Powstaje zatem potrzeba opracowania efektu audio przystosowanego do zmiany parametrów pracy na podstawie rejestrowanych biosygnarów.

2. Opis efektu

„Phaser” jako efekt gitarowy pojawił się w 1967 r., kiedy japońska firma Shin-Ei wprowadziła na rynek model Univibe. Był to pierwszy rodzaj efektu modulacyjnego wykorzystującego przesunięcie fazowe zamiast linii opóźniających. Produkt okazał się sukcesem, a najpopularniejsi gitarzyści, m.in. Jimi Hendrix czy Robin Trower, zaczęli wykorzystywać go w swoich utworach. W 1974 r. Amerykańska firma MXR rozpoczęła

sprzedaż produkowanego do dziś phasera o nazwie MXR Phase 90 (The JHS Show 2021). Konstrukcja MXR Phase 90 opiera się na czterech przesuwnikach fazowych, które tworzą dwa filtry pasmowo-zaporowe o częstotliwościach środkowych modulowanych z wykorzystaniem tranzystorów JFET (Eichas i in. 2014). Phaser konstruowany na potrzeby badań był wzorowany na projekcie właśnie tego modelu.

Jak wspomniano we wstępie, brzmienie phasera powstaje w wyniku modulacji częstotliwości środkowych filtrów pasmowo-zaporowych. Na początku sygnał wejściowy w phaserze jest rozdzielany na dwie osobne kopie. Jedna z nich zostaje przesunięta w fazie o 180° – proces ten dotyczy tylko jednej częstotliwości. Następnie obydwa sygnały zostają zsumowane na wyjściu, powodując tłumienie częstotliwości przesuniętej w fazie w wyniku zjawiska interferencji destruktywnej fal (Keen 1999). Przykład zjawiska interferencji został przedstawiony na rysunku 1. Ogólny schemat blokowy phasera pokazano na rysunku 2.

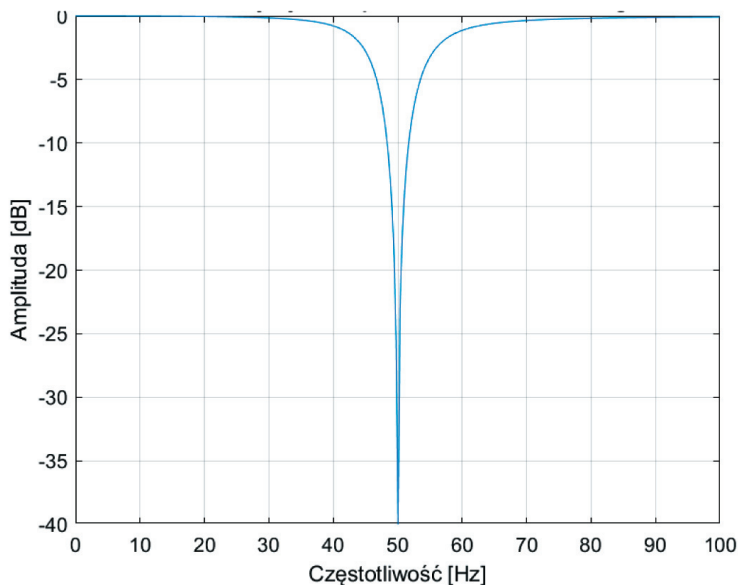


Rys. 1. Zjawisko interferencji konstruktywnej (góra) i destruktywnej (dół)



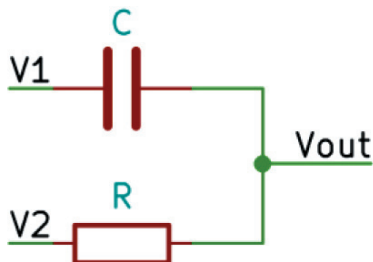
Rys. 2. Przykładowy schemat działania phasera

Po zsumowaniu sygnałów w widmie sygnału wyjściowego słumiona zostaje częstotliwość, dla której została przesunięta faza. Tym samym układ zaczyna pełnić funkcję filtra pasmowo-zaporowego (Kurzela 2020). Przykładowa charakterystyka amplitudowa takiego filtra została przedstawiona na rysunku 3.

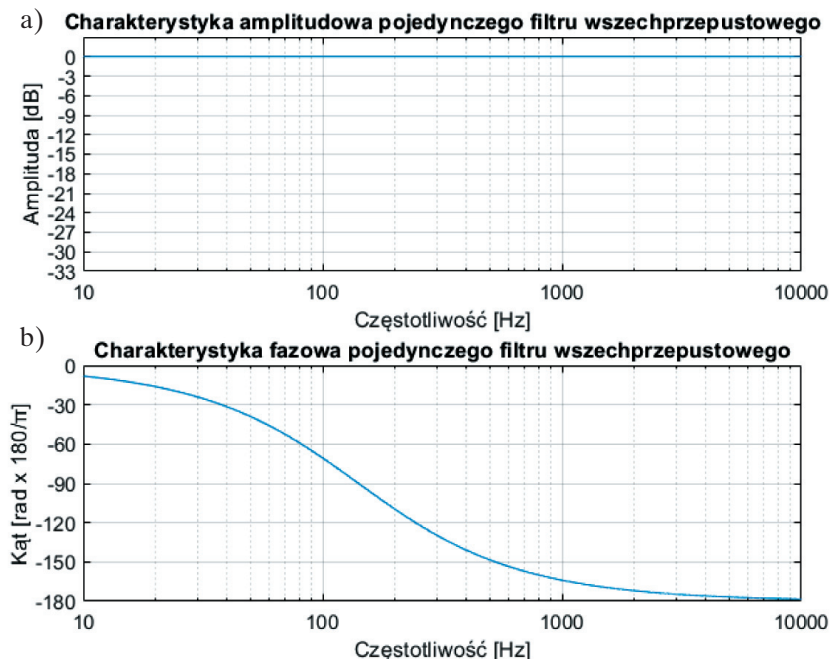


Rys. 3. Przykładowa charakterystyka amplitudowa filtra pasmowo-zaporowego

Aby uzyskać przesunięcie fazowe, phaser wykorzystuje filtry wszechprzepustowe, zwane również przesuwnikami fazy. Układy tego typu nie modyfikują w żaden sposób amplitudy przetwarzanych sygnałów, przesuwają je natomiast w fazie o wartość zależną od częstotliwości (Horowitz i Hill 1995). Przykładowy filtr wszechprzepustowy RC został przedstawiony na rysunku 4, zaś jego charakterystyki amplitudowe oraz fazowe widoczne są na rysunku 5. Na złącze V1 zostaje podany sygnał wejściowy, zaś na złącze V2 – sygnał wejściowy o odwróconej polaryzacji (przesunięty w fazie o 180°).



Rys. 4. Podstawowy układ filtra wszechprzepustowego (przesuwnika fazy)



Rys. 5. Charakterystyka amplitudowa (a) i fazowa (b) pojedynczego filtra wszechprzepustowego

Układ z rysunku 4 można rozpatrywać zarówno jako filtr dolno-, jak i górnoprzepustowy. Jeżeli złącze V2 zewrzymy z masą, całość funkcjonować będzie jako filtr górnoprzepustowy, natomiast po zwarcie z masą złącza V1 – jako filtr dolnoprzepustowy. Impedancja kondensatora maleje wraz ze wzrostem częstotliwości, więc przy bardzo wysokich częstotliwościach kondensator można traktować jako zwarcie, a sygnał podawany na niego staje się sygnałem dominującym na wyjściu z układu. W miarę zmniejszania się częstotliwości sygnału impedancja kondensatora rośnie, a dominować zaczyna sygnał z rezystora. W efekcie amplituda sygnału na wyjściu z filtra nie ulega zmianie, natomiast faza zmienia się o 90° dla tzw. częstotliwości odcięcia danej wzorem (1). Połączenie dwóch takich samych układów pozwala na uzyskanie przesunięcia o 180° (Keen 1999).

$$f_c = \frac{1}{2\pi RC} \quad (1)$$

gdzie:

- f_c – częstotliwość odcięcia filtra [Hz],
- R – rezystancja użytego rezystora [Ω],
- C – pojemność użytego kondensatora [F].

Efekt zmiany częstotliwości odcięcia można uzyskać, wykorzystując tranzystory typu JFET. Wypadkowa impedancja pomiędzy drenem a źródłem tranzystorów zależy od napięcia podanego na bramkę (Eichas i in. 2014, Tietze i Schenk 1996). Jak wynika ze wzoru (1), częstotliwość odcięcia filtra jest zależna od wartości wykorzystanego rezystora. Jeżeli zatem dołączymy równolegle do takiego rezystora tranzystor JFET i podamy na jego bramkę cyklicznie zmieniający się sygnał, wypadkowa impedancja będzie naprzemiennie rosła oraz malała, powodując przesuwanie się częstotliwości odcięcia filtra. Po zsumowaniu sygnału przetworzonego z oryginalnym zostanie uzyskany filtr pasmowo-zaporowy o cyklicznie zmieniającej się częstotliwości środkowej.

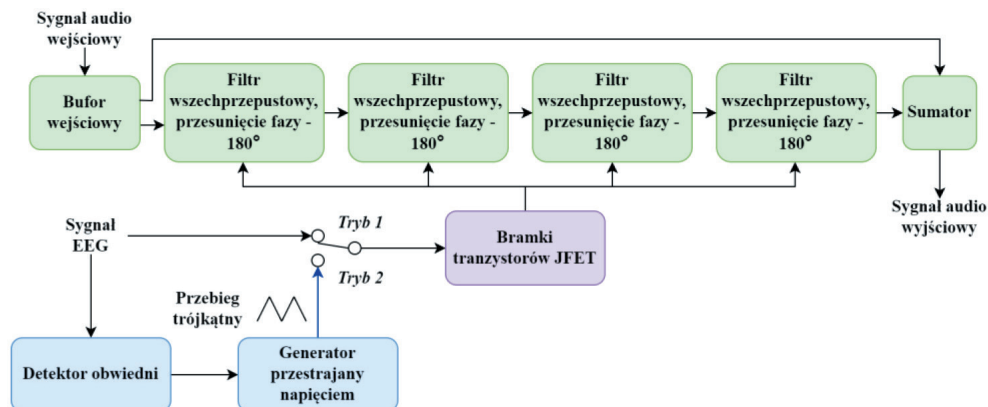
3. Budowa efektu

Projekt efektu jest jedną z części pracy magisterskiej autora (Węgrzyn 2024). Celem projektowanego phasera jest modulowanie dźwięku w wyniku zmiany wartości częstotliwości środkowych dwóch filtrów pasmowo-zaporowych z wykorzystaniem biosygnali rejestrowanych przez elektroencefalograf. Większość efektów modulacyjnych wykorzystuje w swojej budowie LFO (ang. *low frequency oscillator*) generujący sygnał o stałej częstotliwości i amplitudzie (Mitcheltree i in. 2023). W przypadku phasera taki przebieg trafia na bramki tranzystorów JFET, powodując oscylację częstotliwości środkowych filtrów i zmianę brzmienia. Fale rejestrowane przez elektroencefalograf są zazwyczaj złożeniem wielu częstotliwości o dynamicznie zmieniających się amplitudach. Powstaje zatem ryzyko, że biosygnale wykorzystane do modulacji mogą zmieniać się zbyt szybko, by układ był w stanie na nie reagować. Ponadto ich niskie amplitudy mogą okazać się niewystarczające do spowodowania słyszalnej modyfikacji brzmienia. Aby uniknąć wyżej wymienionych ograniczeń, phaser wyposażono w dwa tryby funkcjonowania:

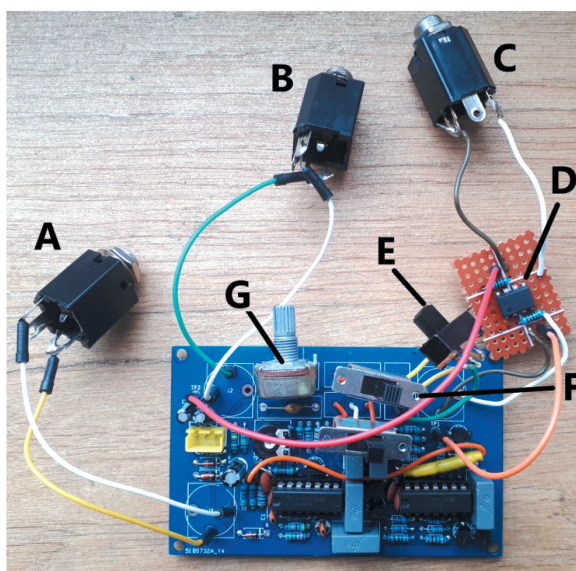
1. Fale zarejestrowane przez elektroencefalograf moduluje sygnał przetwarzany przez phaser. Sygnały EEG i EOG podawane są bezpośrednio na bramki tranzystorów. W tym trybie użytkownik poprzez sygnały EEG i EOG steruje zarówno prędkością, jak i głębokością modulacji.
2. Modulacja odbywa się z wykorzystaniem generatora przestrajanego napięciem VCO (ang. *voltage controlled oscillator*), który wytwarza na wyjściu falę trójkątną o stałej amplitudzie i częstotliwości zależnej od obwiedni sygnału z elektroencefalografu. Głębokość modulacji jest stała, a użytkownik steruje jedynie jej częstotliwością, zmieniając amplitudy biosygnali. W tym trybie phaser moduluje dźwięk z wykorzystaniem sygnału trójkątnego, stosowanego najczęściej w tego typu efektach, co powinno pozytywnie wpłynąć na jakość wrażeń słuchowych.

Projekt w końcowej wersji składał się z pojedynczej płytki PCB, na której umieszczono układ zasilający, bufor audio, cztery filtry wszechprzepustowe o częstotliwościach środkowych sterowanych tranzystorami, detektor obwiedni, generator przestrajany na-

pięciem oraz sumator wyjściowy. Urządzenie zasilono napięciem symetrycznym (dwie baterie o napięciu 9V). Schemat blokowy efektu jest widoczny na rysunku 6. Wybór trybu funkcjonowania phasera odbywa się z wykorzystaniem pojedynczego przełącznika. Płytkę została zaprojektowana w programie KiCad. Rysunek 7 przedstawia końcową wersję po wydrukowaniu i wlutowaniu wszystkich elementów elektronicznych. Do układu dołączona została także niewielka płytkę prototypowa ze wzmacniaczem w celu dodatkowej amplifikacji sygnału na wyjściu. Wszystkie sygnały wejściowe i wyjściowe są przekazywane zarówno do układu, jak i z niego za pośrednictwem gniazd TRS 6,35 mm.



Rys. 6. Schemat blokowy phasera



Rys. 7. Gotowa płytkę PCB phasera

A – wejście audio, B – wejście sygnału EEG, C – wyjście audio, D – wzmacniacz wyjściowy, E – przełącznik ON/OFF układu, F – przełącznik Tryb 1/Tryb 2, G – pokrętło regulujące wzmocnienie

4. Analiza efektu

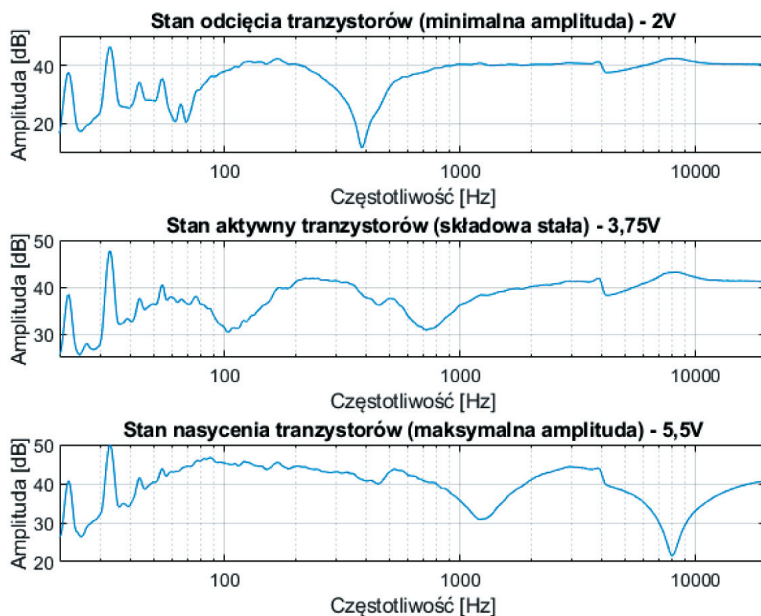
Prezentowane w tym rozdziale analizy zostały wykonane w środowisku Matlab R2024a, natomiast spektrogramy wygenerowano, korzystając z programu Sonic Visualiser.

4.1. Charakterystyka phasera (wpływ napięcia bramki JFET)

Skonstruowany phaser wyróżnia się zmienną charakterystyką amplitudową, zależną od napięcia podanego na bramki tranzystorów JFET. Jednym z najistotniejszych parametrów tranzystorów tego typu jest ich wartość napięcia odcięcia $V_{gs(off)}$. Napięcie to definiuje próg, po którego przekroczeniu tranzystory wchodzi w stan odcięcia. Niestety większość modeli dostępnych na rynku podaje jedynie zakres, w jakim to napięcie może się zawierać. W zastosowanym typie tranzystora 2N5952 napięcie $V_{gs(off)}$ może się różnić nawet o 2,2 V (Fairchild 2021). Ten dość szeroki zakres wymusił konieczność przeprowadzenia testów wyznaczających zależność napięcia na bramce od rezystancji pomiędzy źródłem i drenem, a co za tym idzie – położeniem częstotliwości środkowych filtrów pasmowo-zaporowych w stanie aktywnym tranzystorów. W tym celu wykorzystano zasilacz laboratoryjny generujący napięcie stałe. Napięcie to jako sygnał sterujący tranzystorem było dostarczane na bramki tranzystorów, z kolei na wejście audio phasera podano szum biały o amplitudzie 1 V. Napięcie z generatora zwiększano w zakresie od 0 V do 5,5 V ze skokiem 0,5 V i rejestrowano sygnał wejściowy i wyjściowy układu przez 30 sekund. Dodatkowo multimetrem mierzono wartość rezystancji pomiędzy drenem a źródłem. Tranzystory były spolaryzowane napięciem wynoszącym 5,5 V, zatem im większa była amplituda sygnału na bramkach, tym mniejsza była wartość napięcia V_{gs} . Uzyskane widma szumowe zostały przeanalizowane pod kątem położenia filtrów pasmowo-zaporowych, co pozwoliło wyciągnąć następujące wnioski:

- poniżej 2 V – tranzystory pozostają w stanie odcięcia, wartość rezystancji pomiędzy źródłem i drenem jest maksymalna,
- od 2 V do 5,5 V – tranzystory wchodzi w stan aktywny, wartość rezystancji pomiędzy źródłem i drenem maleje zgodnie z charakterystyką tranzystora,
- powyżej 5,5 V – tranzystory wchodzi w stan nasycenia, wartość rezystancji pomiędzy źródłem i drenem jest minimalna.

Zgodnie z opisanymi powyżej rezultatami sygnał trafiający na bramki tranzystorów, zmieniając się w zakresie od 2 V do 5,5 V, powoduje ciągłą modulację brzmienia. Składowa stała sygnału powinna zatem wynosić 3,75 V, zaś maksymalna amplituda zmian – 1,75 V. Przykładowe widma uśrednione w pasmach 1/12 oktawy uzyskane dla wartości napięć 2 V, 3,75 V i 5,5 V zostały zaprezentowane na rysunku 8.

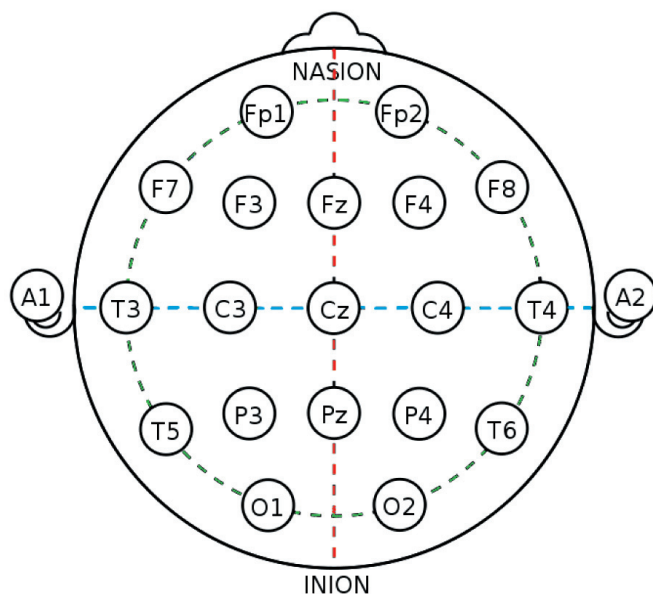


Rys. 8. Zestawienie charakterystyk amplitudowych phasera dla poszczególnych wartości napięcia na bramkach tranzystorów

4.2. Tor pomiarowy

Badanie stopnia kontroli nad parametrami phasera z wykorzystaniem sygnału EEG zostało przeprowadzone w warunkach laboratoryjnych, ograniczając zakłócenia źródeł zewnętrznych. W początkowym etapie konieczne było dobranie odpowiednich regionów na czaszce osoby (operatora) odpowiedzialnej za sterowanie phaserem, do których umocowano elektrody, każdy obszar odpowiada bowiem za inną aktywność mózgową. W praktyce klinicznej elektrody pomiarowe rozlokowywane są na powierzchni głowy według międzynarodowego standardu zwanego Systemem 10–20 (Węgrzyn 2023) (rys. 9). Wyróżnia się sześć rodzajów fal mózgowych, z czego każda z nich zawiera się w innym przedziale częstotliwościowym oraz odzwierciedla inne stany ludzkiego mózgu (Markiewicz 2017). Ich zakresy częstotliwości przedstawiono w tabeli 1.

Pod względem kontroli fal mózgowych fale alfa są uznawane za jedne z najprostszych. Odpowiadają one za relaks, rozluźnienie oraz skupienie. Dodatkowo zaobserwowano, że ich amplituda rośnie w chwili zamknięcia oczu (Markiewicz 2017). Również sama czynność ich otwierania i zamykania powoduje występowanie impulsów elektrycznych związanych z polaryzacją gałki ocznej. Przebiegi tego typu nazywane są elektrookulogramami, zaś ich częstotliwość bardzo często zawiera się w paśmie fal alfa.



Rys. 9. Rozmieszczenie elektrod 10–20 na jednowymiarowym rzucie głowy (System 10–20 2010)

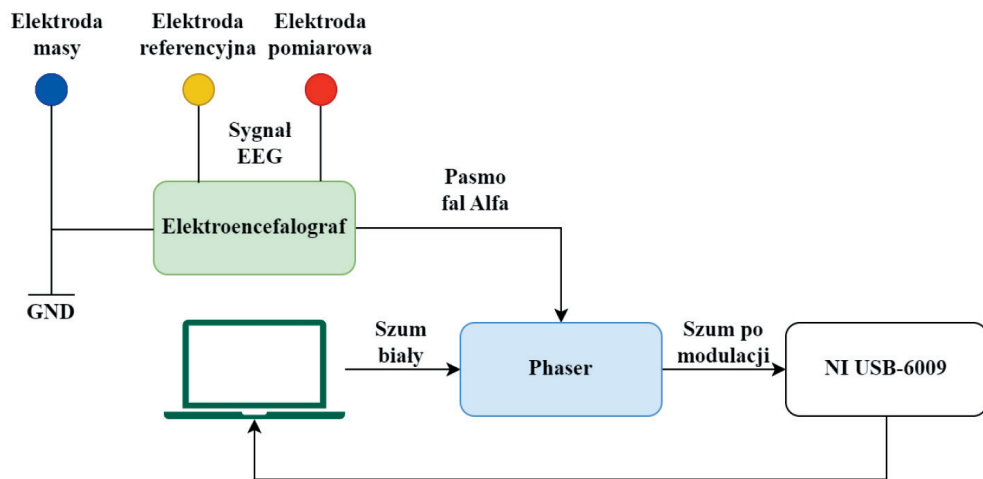
Tabela 1

Zestawienie zakresów częstotliwości fal mózgowych (Markiewicz 2017)

Fala mózgowa	Zakres częstotliwości [Hz]
Delta	0,5–4
Theta	4–8
Alfa	8–12
SMR	12–15
Beta 1	15–18
Beta 2	18–40

W efekcie sygnały EOG mogą powodować dodatkowe wzmocnienie rejestrowanego sygnału EEG ze wspomnianego pasma alfa (Mohammed i in. 2015). Z tego względu elektrody pomiarowa i referencyjna zostały umieszczone na płacie czołowym w pozycjach kolejno Fp1 oraz Fp2, skąd najłatwiej jest zarejestrować sygnały elektrookulograficzne. Elektrode masy umocowano na pozycji A1. Do badania wykorzystano jednorazowe elektrody samoprzylepne. Pojedynczy pomiar trwał 30 sekund. Operator siedział nieruchomo z otwartymi oczami przez 15 sekund, a przez kolejne 15 sekund gwałtownie mrugał. Z uwagi na znane widmo o jednorodnym rozkładzie częstotliwości

jako sygnał wejściowy audio dla phasera zastosowano szum biały generowany z karty dźwiękowej laptopa. Szum po modulacji oraz sygnały na bramkach tranzystorów były rejestrowane przez kartę pomiarową USB-6009 od firmy National Instruments. Założono, że specyfika widma szumu białego pozwoli na łatwą identyfikację i obrazowanie działania układu filtrującego. Schemat blokowy toru pomiarowego zaprezentowano na rysunku 10.

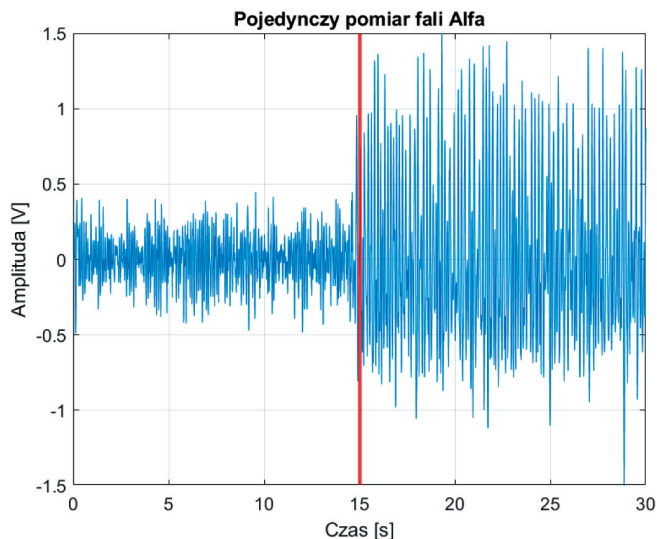


Rys. 10. Schemat blokowy toru pomiarowego

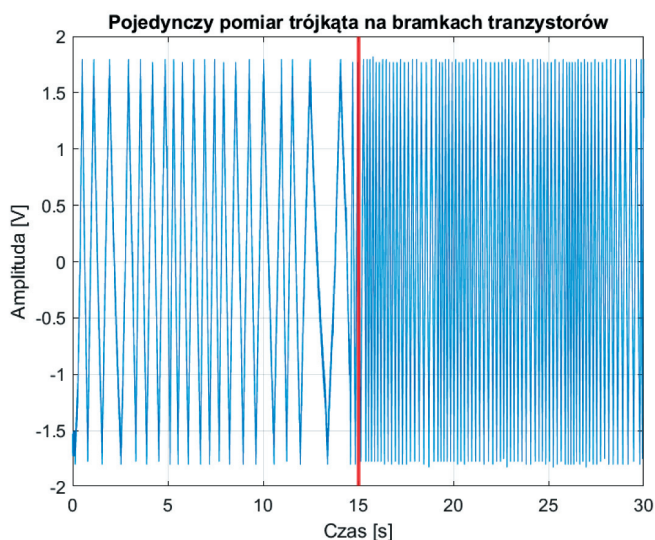
4.3. Analiza spektrogramów

W przypadku przeprowadzania pomiarów w Trybie 1 przebiegi EEG bezpośrednio modulowały sygnał z phasera. Na rysunku 11 przedstawiono przykładowy 30-sekundowy pomiar pasma fali alfa zarejestrowanej z płatu czołowego. Można zauważyć znaczny wzrost amplitudy zarejestrowanego sygnału w momencie rozpoczęcia mrugania. W przypadku pomiarów w Trybie 2 układ podawał na bramki tranzystorów sygnał trójkątny o stałej amplitudzie oraz o częstotliwości zależnej od obwiedni sygnału EEG. Rysunek 12 przedstawia 30-sekundowy przebieg sygnału trójkątnego zarejestrowanego na bramkach. Na rysunkach 11 i 12 czerwoną linią oznaczono 15 sekundę, w której badany rozpoczynał gwałtowne mruganie.

Jak opisano w rozdziale drugim, po dotarciu na bramki tranzystorów JFET sygnał modulujący powodował gwałtowne zmiany częstotliwości środkowej filtrów pasmowo-zaporowych. Po podaniu szumu białego na wejście phasera w spektrogramie sygnału wyjściowego powinny być widoczne dwie silnie tłumione częstotliwości, których zmiany odpowiadają kształtem sygnałowi modulującemu.



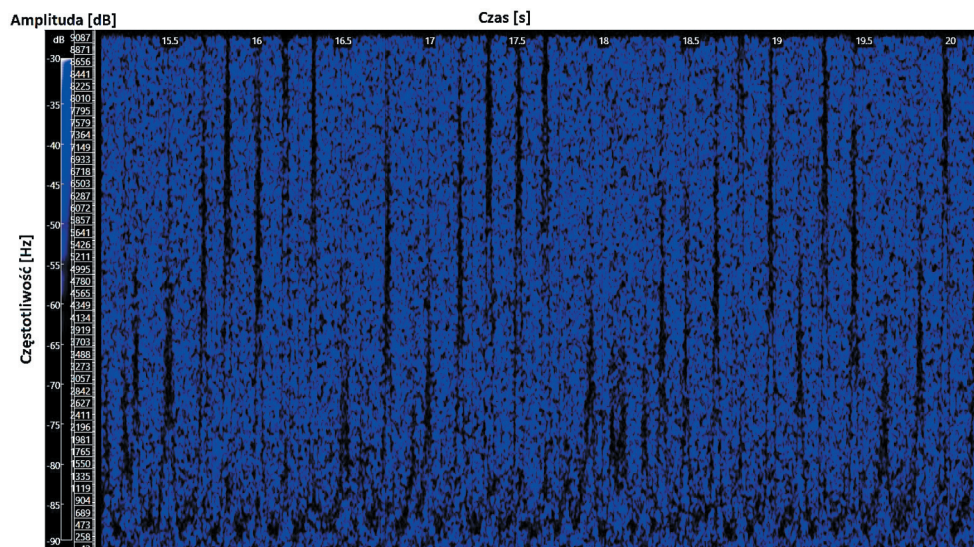
Rys. 11. Przykładowy pojedynczy pomiar fali alfa, czerwoną linią zaznaczono początek mrugania oczami przez badanego



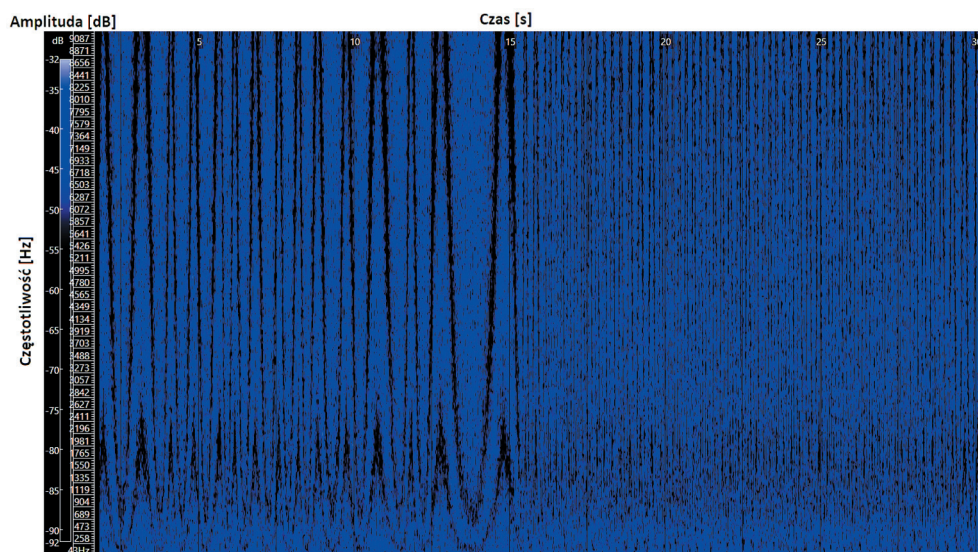
Rys. 12. Przykładowy pojedynczy pomiar sygnału trójkątnego na bramkach tranzystorów, czerwoną linią zaznaczono początek mrugania oczami przez badanego

W przypadku modulacji bezpośrednim sygnałem EEG spektrogram szumu dla 30-sekundowego fragmentu może okazać się nieczytelny (rys. 13). Dlatego wyodrębniono z niego dwa 5-sekundowe fragmenty oznaczone czerwonymi prostokątami. Pierwszy fragment (po lewej) zawiera część sygnału modulowaną podczas otwartych oczu, co oznacza, że amplituda fali alfa jest niewielka. Na rysunku 14 skala częstotliwo-

Rys. 14. Fragment spektrogramu szumu białego podczas otwartych oczu, skala logarytmiczna



Rys. 15. Fragment spektrogramu szumu białego podczas mrugania oczami przez badanego, skala liniowa



Rys. 16. Spektrogram szumu białego uzyskany po modulacji sygnałem trójkątnym o częstotliwości zależnej od obwiedni fali alfa

Analizując rysunki od 13 do 15, można zaobserwować znaczną różnicę w głębokości modulacji pomiędzy poszczególnymi fragmentami (bez mrugania i z mruganiem). W przypadku fragmentu przy otwartych oczach zakres przemiatania częstotliwości wy-

nosił od 500 Hz do 1700 Hz w górnych częstotliwościach i od 80 Hz do 400 Hz w dolnych. Wartości te są jednak mocno przybliżone, ponieważ zarówno zbyt duża prędkość, jak i zbyt mała głębokość modulacji uniemożliwiły precyzyjną analizę. W przypadku fragmentu sygnału podczas mrugania oczami modulacja odbywa się w pełnym zakresie częstotliwości, zaś jej prędkość maleje na tyle, by dało się wyróżnić pojedyncze przebiegi. Co istotne, uzyskane tłumienia są położone w regularnych odstępach. Oznacza to, że pomimo zastosowania sygnału będącego złożeniem pewnego pasma częstotliwości wzrost amplitudy fali alfa jest wystarczający, by spowodować dominację pojedynczej częstotliwości nad pozostałymi.

Jak można zaobserwować na wykresie 12, częstotliwość sygnału trójkątnego zgodnie z przewidywaniami gwałtownie wzrasta w momencie rozpoczęcia mrugania oczami. Jeśli zaś chodzi o uzyskany spektrogram (rys. 16), w przeciwieństwie do tego otrzymanego przy bezpośredniej modulacji sygnałem EEG (rys. 13), modulacja jest wyraźna zarówno w niskich, jak i w wysokich częstotliwościach. Wpływ obydwu filtrów jest widoczny, a zmiany w prędkości modulacji są istotnie zależne od sygnału trójkątnego. Odbywa się to jednak kosztem kontroli nad jej głębokością, która pozostaje stała.

5. Podsumowanie

Celem niniejszej pracy było skonstruowanie efektu audio zdolnego do modulacji brzmienia na podstawie biosygnali rejestrowanych na skórze głowy człowieka. Jako efekt został wybrany phaser, zaś jego budowa opierała się na modelu MXR Phase 90. Zaprojektowany efekt audio wykonano fizycznie (stworzono układ PCB) oraz przeprowadzono pomiary testujące poprawność jego działania. Efekt wyposażono w dwa tryby umożliwiające zarówno bezpośrednie kontrolowanie modulacji przez biosygnali, jak i wykorzystanie generatora przestrajanego napięciem generującego falę trójkątną o częstotliwości zależnej od obwiedni fal EEG.

Analiza zależności charakterystyki amplitudowej efektu od napięcia sterującego na bramkach tranzystora odbyła się z wykorzystaniem zasilacza laboratoryjnego generującego napięcie stałe. Wyznaczona została wartość amplitudy (ustalona doświadczalnie na 1,75 V) oraz składowej stałej sygnału sterującego (3,75 V) wymagana do uzyskania ciągłej modulacji w pełnym zakresie częstotliwości (obie wartości z uwagi na jakość zastosowanych tranzystorów JFET każdorazowo powinny zostać wyznaczone doświadczalnie).

Porównano także spektrogramy sygnałów przetworzonych przez phaser w jego dwóch trybach. W obydwu przypadkach operator sterował efektem, wykorzystując zjawisko wzmacniania sygnału EEG z pasma fal alfa przez mruganie oczami.

W trybie bezpośredniego sterowania przebiegiem EEG niskie amplitudy fali alfa skutkowały małą głębokością modulacji, co prowadziło do bardzo słabej i niewyraźnej zmiany sygnału. Rozpoczęcie mrugania powodowało natomiast gwałtowny wzrost amplitudy, niemal natychmiast zwiększając zakres przemiatania do prawie maksymalnych wartości. Ponadto niższe częstotliwości sygnału sterującego stały się dominujące, przez co uzyskano wyraźniejszą modulację.

W trybie wykorzystującym sygnał trójkątny z generatora przestrajanego napięciem pochodzącym z obwiedni wzmocnionego sygnału EEG efekt okazał się znacznie łatwiejszy do kontrolowania. Mruganie oczami powodowało natychmiastowy wzrost amplitudy sygnału EEG, co przekładało się na zwiększenie częstotliwości przebiegu trójkątnego trafiającego na bramki tranzystorów. Modulacja zarówno fragmentów bez mrugania, jak i z mruganiem była znacznie wyraźniejsza niż w przypadku bezpośredniego sterowania przebiegiem EEG. To rozwiązanie charakteryzowało się jednak ograniczeniem, ponieważ użytkownik nie miał możliwości kontroli głębokości modulacji.

W subiektywnej ocenie użytkowników efektu brzmienie uzyskanego phasera znacząco różni się pomiędzy zbadanymi trybami. W Trybie 1 (bezpośrednia modulacja sygnałem EEG) modulacja fragmentu bez mrugania oczami jest niemalże niesłyszalna, natomiast we fragmencie z mruganiem prędkość zmian modulacji jest zbyt duża (przez co słabo słyszalna). W przypadku Trybu 2 brzmienie efektu jest porównywalne z brzmieniem zwykłego phasera, zarówno dla fragmentu z mruganiem, jak i bez mrugania.

Skonstruowany phaser umożliwia modulację dźwięku z wykorzystaniem biosygnałów, a także zapewnia użytkownikowi kontrolę nad jego parametrami. W ostatecznej ocenie modulacja z wykorzystaniem generatora przestrajanego napięciem zapewnia lepsze brzmieniowo wrażenia słuchowe z równoczesnym zachowaniem dostatecznej kontroli nad prędkością modulacji.

Literatura

- Adrian E.D., Matthews B.H.C., 1934, *The Berger rhythm: potential changes from the occipital lobes in man*, Brain: A Journal of Neurology, vol. 57, s. 355–385, <https://doi.org/10.1093/brain/57.4.355>.
- Eichas F., Fink M., Holters M., Zölzer U., 2014, *Physical Modeling of the MXR PHASE 90 Guitar Effect Pedal*, Department of Signal Processing and Communications, Hamburg.
- Fairchild Semiconductor, 2002, 2N5952, N-Channel RF Amplifier Datasheet, <https://www.mouser.com/datasheet/2/149/2N5952.pdf> [dostęp: 17.06.2024].
- Horowitz P., Hill W., 1995, *Sztuka elektroniki, cz. I*, wyd. 2 zmien., Wydawnictwa Komunikacji i Łączności WKŁ, Warszawa.

- Keen R.G., 1999, *The Technology of Phasers and Flangers*, GeoFex, http://www.geofex.com/article_folders/phasers/phase.html [dostęp: 17.06.2024].
- Kurzela M., 2020, *Filtr pasmowo-zaporowy 50 Hz*, Elektronika Praktyczna, s. 55–57, https://ep.com.pl/files/ppx/12966-ep_2020-03_055-057.pdf [dostęp: 17.06.2024].
- Markiewicz R., 2017, *Zastosowanie EEG Biofeedback/Neurofeedback w rehabilitacji psychiatrycznej*, Psychiatria Polska, t. 51, nr 6, s. 1095–1106, <https://doi.org/10.12740/PP/68919>.
- Mitcheltree C., Steinmetz C.J., Comunité M., Reiss J.D., 2023, *Modulation Extraction for LFO-driven Audio Effects*, Centre for Digital Music, Queen Mary University of London, <https://doi.org/10.48550/arXiv.2305.13262>.
- Mohammed A.Z., Ahmed S.S., Seha S.N.A., 2015, *A New EEG Acquisition Protocol for Biometric Identification Using Eye Blinking Signals*, International Journal of Intelligent Systems and Applications, s. 48–54, <https://doi.org/10.5815/ijisa.2015.06.05>.
- Paalasmaa J., Murphy D., Holmqvist O., 2012, *Analysis of Noisy Biosignals for Musical Performance*, Department of Computer Science, University of Helsinki, Finland, Lecture Notes in Computer Science, vol. 7619, s. 241–252, https://doi.org/10.1007/978-3-642-34156-4_23.
- Straebel V., Thoben W., 2014, *Alvin Lucier's "Music for Solo Performer": Experimental music beyond sonification*, Cambridge University Press, vol. 19, s. 17–29, <https://doi.org/10.1017/S135577181300037X>.
- System 10-20, 2010, *Electrode locations of International 10-20 system for EEG (electroencephalography) recording*, [https://en.wikipedia.org/wiki/10%E2%80%9320_system_\(EEG\)#/media/File:21_electrodes_of_International_10-20_system_for_EEG.svg](https://en.wikipedia.org/wiki/10%E2%80%9320_system_(EEG)#/media/File:21_electrodes_of_International_10-20_system_for_EEG.svg) [dostęp: 17.06.2024].
- Teplan M., 2002, *Fundamentals of EEG Measurement*, Measurement Science Review, vol. 2, sect. 2, s. 1–11.
- Tietze U., Schenk C., 1996, *Układy półprzewodnikowe*, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa.
- The JHS Show, 2021, *Legendary Phasers*, <https://thejhsshow.com/articles/legendary-phasers> [dostęp: 17.06.2024].
- Vidal J.J., 1973, *Toward Direct Brain-Computer Communication*, Annual Review of Biophysics, vol. 2, s. 157–180, <https://doi.org/10.1146/annurev.bb.02.060173.001105>.
- Węgrzyn F., 2023, *Budowa elektroencefalografu do oceny bodźców akustycznych*, Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica w Krakowie [praca inżynierska].
- Węgrzyn F., 2024, *Kontrola parametrów efektu audio z wykorzystaniem sygnału EEG*, Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica w Krakowie [praca magisterska].
- Zölzer U., 2011, *DAFX: Digital Audio Effects*, wyd. 2, Wiley, Hoboken, s. 7–14.

Porównanie metod uzdatniania mechanicznego popiołu lotnego wapiennego

Jan Ziaja¹ , Krzysztof Szerszeń² 

¹ AGH Akademia Górniczo-Hutnicza, Wydział Wiertnictwa, Nafty i Gazu, Kraków

² Górażdże Cement S.A., Chorula

Streszczenie: W artykule porównano dwie metody mechanicznego uzdatniania popiołu lotnego wapiennego mogące mieć zastosowanie w skali przemysłowej. Głównym celem tych metod jest zwiększenie udziału popiołu w spoiwach/zaczynach stosowanych w geoinżynierii. Do badań wykorzystano próbki popiołu pozyskanego z Elektrowni Bełchatów. Do uzdatniania użyto metody mielenia oraz metody przesiewu. Oznaczono skład chemiczny popiołu, gęstość oraz stopień zmielenia – definiowany powierzchnią właściwą wg Blaine’a, określono wielkości charakterystyczne, takie jak pozostałość na sicie 0,090 mm oraz mialkość. Do określenia wpływu aktywacji mechanicznej popiołu na jego właściwości fizyczne użyto mieszanin popiołowo-cementowych w proporcjach 30/70 i 70/30, a wyznacznikami tego wpływu były wyniki badań wodożądności oraz wskaźnika aktywności. W obydwu procesach uzyskano znaczną poprawę właściwości fizycznych popiołu lotnego wapiennego w porównaniu z próbką w stanie naturalnym.

Słowa kluczowe: popiół lotny wapienny, uzdatnianie, hydrauliczne spoiwa drogowe, wgłębne mieszanie gruntu, przesłona przeciwfiltracyjna

COMPARISON OF MECHANICAL TREATMENT THE PHYSICAL PARAMETERS OF CALCAREOUS FLY ASH

Abstract: The article compares two methods of mechanical treatment the physical parameters of calcareous fly ash which can be used on an industrial scale. The main purpose of using these methods is to increase the share of ash in the binder/slurry used in geoengineering. The tests were carried out for ash samples obtained from the Bełchatów Power Plant. Grinding and sieving methods were used for the treatment. The scope of the research included the chemical composition of the ash, density and the degree of grinding – defined by the specific surface according to Blaine. The granulometric distribution and characteristic sizes such as the residue on the 0.090 mm sieve and fineness were also of the study. To determine the impact of ash milling on its physical properties, the ash-cement mixtures in the proportions of 30/70 and 70/30 were used, and the determinants were the results of water demand tests and the activity index. The significant improvement in the physical parameters of calcareous fly ash was achieved in both processes compared to the sample in its natural state.

Keywords: calcareous fly ash, treatment of fly ash, hydraulic road binders, deep soil mixing, sealing walls

1. Wprowadzenie

Zmiany związane z transformacją energetyczną w Polsce mają i będą mieć coraz większy wpływ na dostępność popiołów lotnych powstających przy produkcji energii elektrycznej. Przejście z produkcji energii z węgla na OZE, a wkrótce również na atom, spowoduje drastyczny spadek odstępności popiołów, które są szeroko stosowane w budownictwie i geoinżynierii. W niektórych aplikacjach popiół jest praktycznie niezbędnym technologicznie składnikiem do przeprowadzenia procesu budowlanego. Znaczące jego ograniczenie będzie generowało duży wzrost cen tego „odpadu” z uwagi na niską podaż. Również pogarszająca się jakość powstających popiołów, wynikająca ze zmiennego zapotrzebowania na energię z węgla, może stanowić problem w dotychczasowym ich stosowaniu. Niespełniające wymogów jakościowych popioły trafią na składowiska, co wpłynie negatywnie na środowisko. Popioły powstające w zakładach produkujących energię elektryczną czy ciepłą uzależnione są od wsadu, czyli rodzaju spalanego węgla (kamienny lub brunatny) oraz technologii spalania. Popioły lotne ze spalania węgla kamiennego w konwencjonalnych paleniskach pyłowych są odpadem/produktem szczegółowo przebadanym (Giergiczny 2006, Giergiczny i Giergiczny 2010, Giergiczny i Garbacik 2012), o stosunkowo powtarzalnej jakości i szeroko stosowanym (PN-EN 197-1:2012, PN-EN 206+A2:2021-08, PN-EN 450-1:2012). Popioły powstające przez spalanie węgla kamiennego w kotłach fluidalnych nie były brane pod uwagę w niniejszym opracowaniu. Odminną sytuację obserwuje się w przypadku popiołów lotnych z węgla brunatnego. Ich zagospodarowanie jest znikome z uwagi na dużą zmienność właściwości fizykochemicznych oraz problematyczny skład fazowy i chemiczny. Z tego powodu nie są stosowane w produkcji cementu i betonu. W stanie naturalnym są używane w niewielkich ilościach do ulepszania i osuszania gruntów w budownictwie drogowym (Krajowa Ocena Techniczna 2023, PN-EN 13282-1:2013-07, PN-EN 13282-2:2015-06) oraz w geoinżynierii i inżynierii środowiska jako spoiwa/zaczyny do przesłon przeciwfiltracyjnych w technologii wglębnego mieszania gruntu (Krajowa Ocena Techniczna 2024). Pozostała ilość jest składowana na składowisku. Dotychczas nie opracowano technologii umożliwiającej szersze zastosowanie tych popiołów. Były prowadzone badania, w których potwierdzono pozytywne efekty użycia popiołu wapiennego zarówno w cementach (Dziuk i in. 2013), jak i betonach (Giergiczny i in. 2013, Józwiak-Niedźwiedzka i in. 2011). Przyczyniało się to do wzrostu wytrzymałości na ściskanie oraz zwiększenie szczelności betonu. Ilość popiołu w zastosowanych recepturach spoiw dochodziła do 30%. Większa zawartość powodowała problemy już na etapie formowania próbek do badań (Dziuk i in. 2013). Pozytywny efekt stosowania lotnego popiołu wapiennego osiągnęto dopiero po jego modyfikacji przez mielenie. W żadnym z analizowanych badań nie zastosowano innej, możliwej modyfikacji popiołu, jaką jest przesiew. W podjętej próbie badawczej zostało przyjęte założenie, że możliwe jest zwiększenie udziału popiołu wapiennego w spoiwach/zaczynach stosowanych w geoinżynierii

dzięki mechanicznemu ich ulepszeniu. W tym celu przyjęto dwie metody poprawy jakości popiołów, tj. mielenie i przesiewanie. Ulepszanie popiołu wapiennego przez jego mielenie zostało już przebadane (Szerszeń 2023). Zwiększenie mialkości w tej metodzie pozwoliło na znaczącą poprawę wytrzymałości na ściskanie próbek popiołu nawet o 100%. Wynikało to ze zwiększonej powierzchni właściwej, a także z przemielenia największych ziaren popiołu (o wielkości ponad 0,09 mm), które stanowił głównie niespalony węgiel. W metodzie przesiewu popiołu wapiennego założono, że odseparowanie największych cząstek o najmniejkorzystnym oddziaływaniu poprawi właściwości uzyskanych spoiw. Otrzymane wyniki badań porównano do wyników badań spoiw zawierających popiół wapienny przemielony (Szerszeń 2023).

2. Przedmiot i zakres badań

Próbki lotnych popiołów wapiennych zostały pobrane z bieżącej produkcji Elektrowni Bełchatów. Dostawcą węgla dla tej elektrowni jest obecnie największy w Polsce producent węgla brunatnego: Kopalnia Węgla Brunatnego Bełchatów (44,26 mln ton), co stanowi około 77% całkowitego rocznego wydobycia tego rodzaju węgla (PIG-PIB, 2023). Przy obecnej produkcji energii w Elektrowni Bełchatów powstaje ponad 4,5 mln odpadów paleniskowych rocznie (opracowanie dla Gminy Kleszczów 2015). Tylko niewielka część jest odbierana i wykorzystywana gospodarczo, pozostała ilość trafia na składowiska. Próbki badanych popiołów stanowiły odpad/produkt oferowany przez elektrownię w formie suchej i pylastej. Jako metody ulepszania popiołu przyjęto mielenie oraz przesiewanie. Badano właściwości popiołów w stanie naturalnym, po przemiale w młynku laboratoryjnym oraz po przesiewie. Dla metody przesiewu wybrano trzy charakterystyczne wielkości sit o rozmiarze oczek 0,09 mm, 0,063 mm oraz 0,045 mm. Do badań użyto dwóch partii popiołów pobranych z elektrowni w różnym okresie.

Zakres badań przedstawiony w niniejszym artykule obejmował:

- analizę składu chemicznego oraz straty prażenia zgodnie z PN-EN 196-2:2013-11, *Metody badań cementu. Analiza chemiczna cementu*;
- gęstość oraz stopień zmielenia – powierzchnia właściwa wg Blaine’a zgodnie z PN-EN 196-6:2011, *Metody badania cementu – Część 6: Oznaczanie stopnia zmielenia*;
- skład granulometryczny zgodnie z instrukcją obsługi aparatu Mastersizer 2000;
- pozostałość na sicie 0,090 mm zgodnie z PN-EN 196-6:2011, *Metody badania cementu – Część 6: Oznaczanie stopnia zmielenia*;
- mialkość zgodnie z PN-EN 451-2:2017-06, *Metoda badania popiołu lotnego – Część 2: Oznaczanie mialkości przez przesiewanie na mokro*;
- wodozgodność oraz wskaźnik aktywności zgodnie z PN-EN 450-1:2012, *Popiół lotny do betonu – Część 1: Definicje, specyfikacje i kryteria zgodności*.

3. Wyniki badań

Próbka z oznaczeniem *N* to próbka w stanie naturalnym, z oznaczeniem *M* to próbka zmielona, z oznaczeniem *P* – próbka przesiana z podaną wielkością oczka sita. Skład chemiczny i straty prażenia próbek popiołów ulepszanych przez przesiew był badany dla każdej wielkości oczek sita. Skład chemiczny i straty prażenia wykonane na próbkach w stanie naturalnym przyjęto jako równoznaczny dla próbek przemielonych, ponieważ proces przemiału nie zmienia składu chemicznego materiału.

W obydwu badanych metodach spoiwem odniesienia był cement portlandzki CEM 42,5 R o właściwościach przedstawionych w tabelach 1 i 2.

Tabela 1
Skład chemiczny cementu portlandzkiego CEM I 42,5R

Oznaczenie próbki	Skład chemiczny [% wag.]							
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Cl ⁻	Na ₂ O _{eq}
CEM I 42,5R	19,7	4,7	4,0	63,9	1,6	2,9	0,062	0,61

Źródło: Szerszeń (2023)

Tabela 2
Właściwości fizyczne cementu portlandzkiego CEM I 42,5R

Początek czasu wiązania [min]	190
Stąłość objętości [mm]	0,5
Wytrzymałość na ściskanie [MPa] po 2 dniach	27,5
Wytrzymałość na ściskanie [MPa] po 7 dniach	48,4
Wytrzymałość na ściskanie [MPa] po 28 dniach	57,1

Źródło: Szerszeń (2023)

W tabeli 3 zaprezentowano skład chemiczny popiołu wapiennego i straty prażenia.

Tabela 3
Skład chemiczny popiołu wapiennego i straty prażenia

Oznaczenie próbki popiołu W	Strata prażenia [% wag.]	Skład chemiczny [% wag.]									
		SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	CaO _w	MgO	SO ₃	Cl ⁻	Na ₂ O	K ₂ O
PWB-1-N, PWB-1-M	4,46	28,0	30,5	10,8	24,8	2,0	1,3	3,0	<0,001	<0,01	0,13
PWB-1-P 0,045 mm	1,12	20,0	25,6	14,4	30,5	1,7	1,2	6,8	<0,001	<0,01	0,1
PWB-1-P 0,063 mm	1,46	25,1	28,0	12,3	27,4	2,2	1,3	4,0	0,019	<0,01	0,3

Tabela 3 cd.

PWB-1-P 0,090 mm	3,36	31,1	27,5	10,8	21,5	1,2	1,9	3,9	0,022	0,8	0,8
PWB-2-N, PWB-2-M	3,94	27,9	33,2	12,2	21,8	0,9	0,9	2,0	<0,001	<0,01	0,12
PWB-2-P 0,045 mm	1,02	20,4	29,0	15,5	26,5	0,6	1,2	5,7	0,018	<0,01	0,1
PWB-2-P 0,063 mm	1,12	22,1	29,9	14,2	25,4	0,7	1,1	5,4	0,020	<0,01	<0,01
PWB-2-P 0,090 mm	4,52	24,1	31,5	13,8	24,6	0,7	1,2	2,9	0,018	<0,01	0,1

Źródło: opracowanie własne i Szerszeń (2023)

Proces przemiału został przeprowadzony w młynku laboratoryjnym o wielkości nadawy około 5 kg. Czas mielenia trwał 15 minut dla każdej próbki. Po przemiale zbadano stopień zmielenia zdefiniowany powierzchnią właściwą wg Blaine’a oraz gęstość. Proces przesiewu przeprowadzono na sitach o wielkości oczka 0,09 mm, 0,063 mm i 0,045 mm. Uzyskane wartości przedstawia tabela 4.

Tabela 4
Stopień zmielenia i gęstość popiołów wapiennych

Oznaczenie próbki	Powierzchnia właściwa wg Blaine’a [cm ² /g]	Gęstość [g/cm ³]
PWB-1-N	3510	2,80
PWB-1-M	8460	2,95
PWB-1-P 0,045 mm	4700	3,02
PWB-1-P 0,063 mm	4350	2,69
PWB-1-P 0,090 mm	4110	2,86
PWB-2-N	3910	2,84
PWB-2-M	8100	2,96
PWB-2-P 0,045 mm	4950	3,05
PWB-2-P 0,063 mm	4660	3,01
PWB-2-P 0,090 mm	4460	2,96

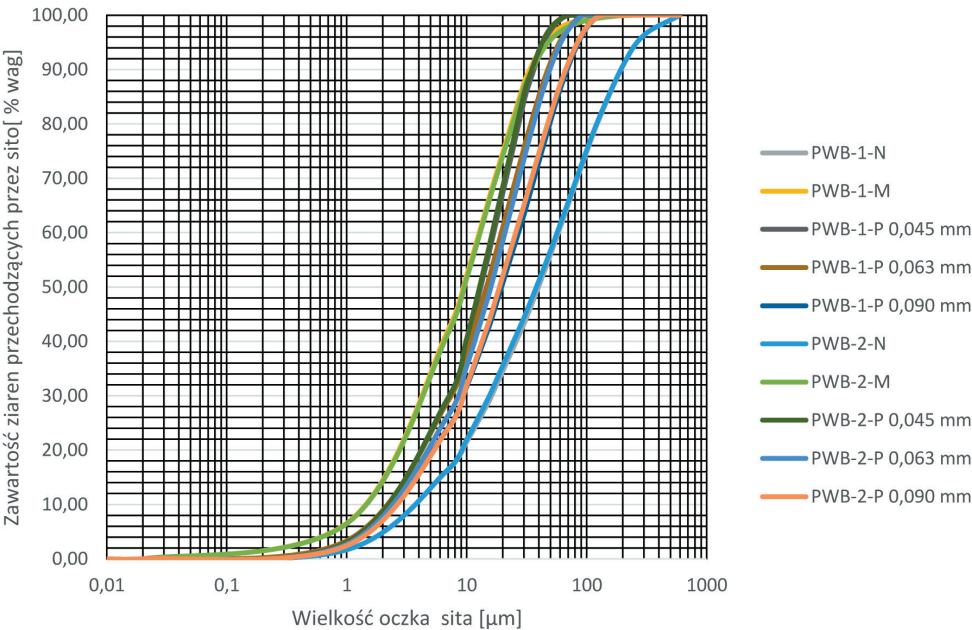
Źródło: opracowanie własne i Szerszeń (2023)

Skład granulometryczny został oznaczony przez procentową zawartość ziaren przechodzących przez sito o zdefiniowanym rozmiarze. Wyniki zestawiono w tabeli 5, a graficzne przedstawienie uziarnienia na rysunku 1.

Tabela 5
Skład granulometryczny popiołów wapiennych

Oznaczenie próbki	PWB-1-N	PWB-1-M	PWB-1-P 0,045 mm	PWB-1-P 0,063 mm	PWB-1-P 0,090 mm	PWB-2-N	PWB-2-M	PWB-2-P 0,045 mm	PWB-2-P 0,063 mm	PWB-2-P 0,090 mm
Wielkość oczka sита [mm]	Zawartość ziaren przechodzących przez sito [% wag.]									
0,007	16,3	42,1	29,60	29,02	24,04	16,5	41,4	29,58	26,36	23,91
0,010	21,5	52,2	40,08	38,26	31,68	21,9	51,6	40,48	35,37	31,96
0,016	29,8	67,7	57,90	53,01	43,83	30,7	67,1	59,11	50,14	44,94
0,032	44,7	89,1	86,34	77,79	65,39	45,8	88,2	87,60	75,81	67,17
0,045	53,2	95,1	95,42	88,58	76,99	54,1	94,2	96,05	87,37	78,44
0,063	62,2	98,0	99,47	96,04	87,66	62,8	97,3	99,57	95,56	88,51
0,090	71,9	99,1	100,00	99,80	95,96	72,3	98,8	100,00	99,77	96,24
0,125	80,5	99,5	100,00	100,00	99,69	80,8	99,4	100,00	100,00	99,71
0,300	96,3	100,0	100,00	100,00	100,00	96,3	100,0	100,00	100,00	100,00

Źródło: opracowanie własne i Szerszeń (2023)



Rys. 1. Krzywe uziarnienia z analizy sitowej popiołów lotnych wapiennych w stanie naturalnym, po przemiale i po przesiewie

Wielkości charakterystyczne uziarnienia zostały określone przez właściwości: pozostałość na sicie 0,090 mm oraz miałkość. Otrzymane wyniki przedstawiono w tabeli 6.

Tabela 6
Pozostałość na sicie 0,090 mm i miałkość

Oznaczenie próbki	Pozostałość na sicie 0,090mm [% wag.]	Miałkość [% wag.]
PWB-1-N	28,1	46,8
PWB-1-M	0,9	4,9
PWB-1-P 0,045 mm	0,0	4,6
PWB-1-P 0,063 mm	0,0	11,4
PWB-1-P 0,090 mm	4,0	23,0
PWB-2-N	27,7	46,0
PWB-2-M	1,2	5,8
PWB-2-P 0,045 mm	0,0	4,0
PWB-2-P 0,063 mm	0,2	12,6
PWB-2-P 0,090 mm	3,8	21,6

Źródło: własne i Szerszeń (2023)

Kolejną badaną właściwością była wodożądność oraz wskaźnik aktywności K_7 , K_{28} i K_{90} . Do tych badań przygotowano mieszaniny o składzie: popiół wapienny (30%) i cement portlandzki CEM I 42,5R (70%) oraz popiół wapienny (70%) i cement portlandzki CEM I 42,5R (30%). Próbką odniesienia był cement CEM I 42,5R. Uzyskane wyniki zestawiono w tabeli 7.

Tabela 7
Wodożądność i wskaźnik aktywności mieszanin popiołowo-cementowych

Oznaczenie próbki	Zawartość popiołu wapiennego w mieszaninie [%]	Wodożądność [%]	Wskaźnik aktywności [%]		
			po 7 dniach	po 28 dniach	po 90 dniach
PWB-1-N	30	119,1	51,8	66,7	76,0
	70	148,4	0,8	13,3	26,2
PWB-1-M	30	102,2	78,6	105,5	107,1
	70	110,2	6,2	42,0	73,1
PWB-1-P 0,045 mm	30	100,0	78,3	93,6	91,4
	70	108,4	26,6	41,9	50,8
PWB-1-P 0,063 mm	30	106,2	77,5	93,6	103,6
	70	120,4	8,2	35,5	54,9
PWB-1-P 0,090 mm	30	108,9	68,2	85,8	91,1
	70	132,9	3,7	20,6	36,9
PWB-2-N	30	118,7	52,2	67,0	73,2
	70	137,8	3,2	9,8	23,7
PWB-2-M	30	102,7	74,2	99,4	106,5
	70	109,6	3,6	20,7	50,9
PWB-2-P 0,045 mm	30	104,4	73,6	91,6	95,5
	70	120,4	10,2	20,0	46,2
PWB-2-P 0,063 mm	30	107,6	68,2	89,7	95,8
	70	131,6	6,6	17,7	36,0
PWB-2-P 0,090 mm	30	110,2	60,7	79,7	88,1
	70	104,4	73,6	91,6	95,5

Źródło: opracowanie własne i Szerszeń (2023)

4. Omówienie wyników

Otrzymane wyniki badań stanowią podstawę do zwiększenia udziału popiołu lotnego wapiennego w recepturach spoiw/zaczynów używanych w geoinżynierii i inżynierii środowiska, jak również umożliwiają zastąpienie drogich i coraz trudniej dostępnych popiołów lotnych krzemionkowych lub granulowanego żużla wielkopiecowego.

1. Straty prażenia dla wszystkich próbek badanych popiołów były poniżej 5%, co kwalifikuje je do kategorii A według normy PN-EN 450-1:2012, *Popiół lotny do betonu – Część 1: Definicje, specyfikacje i kryteria zgodności*.
2. Z analiz składu chemicznego wynika, że przebadane próbki wykazują zbliżone do siebie wartości.
3. W przypadku próbek uzdatnianych przez przesiew wraz ze wzrostem wielkości oczka sita zwiększa się strata prażenia. Świadczy to o separacji na poszczególnych sitach ziaren niespalonego węgla w postaci koksiku, który zwiększa wodoodporność, zmniejsza efektywność domieszek chemicznych oraz obniża mrozoodporność.
4. Powierzchnia właściwa wg Blaine'a dla próbek w stanie naturalnym dla partii PWB-1-N wynosi $3510 \text{ cm}^2/\text{g}$, a dla partii drugiej PWB-2-N wynosi $3910 \text{ cm}^2/\text{g}$. W wyniku przemiału wartości te zwiększyły się ponad 100% i wyniosły odpowiednio $8460 \text{ cm}^2/\text{g}$ i $8100 \text{ cm}^2/\text{g}$. Świadczy to o dużej łatwości mielenia tego popiołu, co jest ważnym wskaźnikiem w jego szerszym wykorzystaniu. Przesiew również powoduje wzrost powierzchni właściwej wraz ze zmniejszaniem się oczka sita, ale maksymalnie o 30%.
5. Gęstość badanych próbek charakteryzuje się niską zmiennością i nieznacznie wzrasta w obydwu procesach ulepszania popiołu.
6. Skład granulometryczny próbek w stanie naturalnym był podobny. W wyniku przemiału uległ proporcjonalnej zmianie. Proces przesiewu odseparowywał nadziarno na każdym z granicznych wielkości oczek, które stanowiły głównie niespalone cząstki pyłu węglowego.
7. Pozostałość na sicie $0,090 \text{ mm}$ dla próbek popiołu w stanie naturalnym jest stosunkowo wysoka i wynosi średnio 28%. Dla cementu wzorcowego to około 1%. Po przemiale wartość ta uległa znaczącej zmianie i wyniosła od 0,9% do 1,2%. W przypadku procesu przesiewu jest mniej miarodajna, ponieważ maksymalna wielkość oczka w tej metodzie została przyjęta właśnie w rozmiarze $0,090 \text{ mm}$.
8. Miałkość popiołu w stanie naturalnym wynosząca około 46% przekracza określoną w normie PN-EN 450-1:2012 dopuszczalną wartość $N \leq 40\%$. Po przemiale obydwie próbki spełniły warunek normowy kategorii $S \leq 12\%$, a miałkość wyniosła od 4,9% do 5,8%. Również przesiew powodował wzrost miałkości, ale w mniejszym zakresie niż przemiał.

9. Wodożądność dla mieszanin zawierających popiół w stanie naturalnym przy zawartości 30% wynosiła około 119% i znacznie wzrosła w obydwu próbkach przy zwiększonej ilości popiołu (70%) w zaprawie badawczej odpowiednio 148,4% i 137,8%. Przy takich wartościach wodożądności nie jest możliwe zachowanie odpowiedniej konsystencji i urabialności zaprawy w czasie. Dla mieszanin na bazie przemielonego popiołu wapiennego wodożądność uległa znaczącej poprawie i przy zawartości 30% wyniosła 102%. Przy zwiększonej ilości popiołu (70%) wartość ta również zmalała do 110%. W procesie przesiewu podobne wyniki dotyczyły tylko próbek przesianych przez sito o maksymalnym oczku 0,045 mm. Popioły z pozostałych wymiarów oczek również zmniejszyły tę właściwość, ale w znacznie mniejszym zakresie. Wszystkie próbki wykazały jednak większą wodożądność niż próbka odniesienia, którą był cement CEM I 42,5R.
10. Wskaźnik aktywności badanych popiołów oznaczono przy dwóch dozowaniach popiołu w składzie spoiwa: 30% i 70%. Dla popiołu w stanie naturalnym, przy zawartości popiołu 30%, po 7 dniach wartość wyniosła około 52%, po 28 dniach około 67%, a po 90 dniach 76% i 73,2%. Wartości te nie spełniały wymagań normy PN-EN 450-1:2012, która określa aktywności po 28 dniach na $\geq 75\%$, a po 90 dniach na $\geq 85\%$. Zwiększenie zawartości popiołu w badanych próbkach do 70% spowodowało drastyczny spadek aktywności próbki z popiołem PWB-1-N do 0,8%, a próbki PWB-2-N do 3,6% po 7 dniach. Po 28 dniach wartości wzrosły do 13,3% i 9,8%, a po 90 dniach do 26,2% i 23,7%. Na podstawie otrzymanych wyników należy stwierdzić, że nie jest możliwe zwiększenie udziału popiołu w stanie naturalnym w planowanych mieszaninach mineralnych. Zastosowanie przemielonego popiołu w mieszaninie, przy zawartości popiołu 30%, poprawiło wartość aktywności i po 7 dniach wyniosła ona od 78,6% i 74,2%, po 28 dniach – 105,5% i 99,4%, a po 90 dniach – 107,1% i 106,5%. Wartości te spełniły wymagania normy PN-EN 450-1:2012. Zwiększenie zawartości popiołu w badanych próbkach do 70% spowodowało znaczny spadek aktywności do 6,2% i 3,6% po 7 dniach, po 28 dniach do 42,0% i 20,7%, a po 90 dniach do 73,1% i 50,9%. Podobna zależność została otrzymana w próbkach popiołu ulepszanego przez przesiew. W tej metodzie wskaźnik aktywności zwiększał się wraz ze zmniejszeniem wymiaru oczka sita w przygotowanej próbce popiołu. Próbką odniesienia był cement CEM I 42,5R. W przeprowadzonych badaniach wskaźnika aktywności zastosowano większy udział popiołu w mieszaninie, niż wymaga tego norma PN-EN 450-1:2012, która podaje jego zawartość na poziomie 25%.

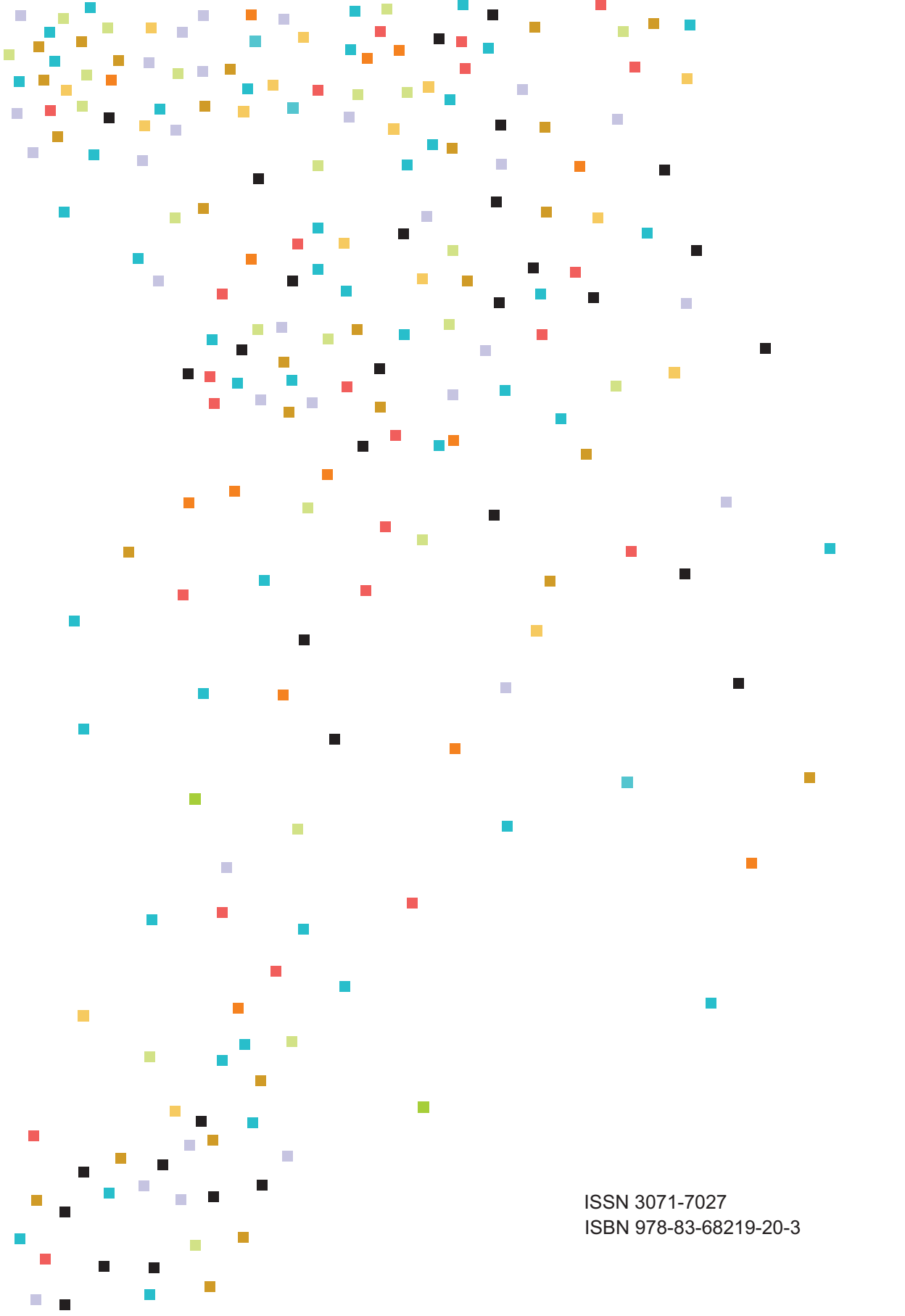
Uzyskane wyniki potwierdzają możliwość zastosowania popiołu lotnego wapiennego jako zamiennika cementu w ilości minimum 30%, a w niektórych przypadkach nawet do 70% masy w spoiwach i zaczynach używanych w geoinżynierii i inżynierii śró-

dowiska. Wymaga to jednak ulepszenia popiołu przez zastosowanie jednej z metod opisanych przez autorów tego artykułu.

Literatura

- Dziuk D., Giergiczny Z., Garbacik A., 2013, *Popiół lotny wapienny jako składnik główny cementów powszechnego użytku*, Roads and Bridges – Drogi i Mosty, t. 12, nr 1, s. 57–69.
- Giergiczny E., Giergiczny Z., 2010, *Kategoryzacja popiołów lotnych a właściwości kompozytów cementowo-popiołowych*, Materiały Ceramiczne, t. 62, nr 1, s. 81–86.
- Giergiczny Z., 2006, *Rola popiołów lotnych wapniowych i krzemionkowych w kształtowaniu właściwości współczesnych spoiw budowlanych i tworzyw cementowych*, Monografia – Politechnika Krakowska im. Tadeusza Kościuszki. Inżynieria Lądowa, t. 325, Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej, Kraków.
- Giergiczny Z., Garbacik A., 2012, *Właściwości cementów z dodatkiem popiołu lotnego wapiennego*, Cement – Wapno – Beton, R. 79, nr 4 s. 217–224.
- Giergiczny Z., Synowiec K., Żak A., 2013, *Ocena przydatności popiołu lotnego wapiennego jako aktywnego dodatku mineralnego do betonu*, Roads and Bridges – Drogi i Mosty, t. 12, nr 1, s. 83–97.
- Jóźwiak-Niedźwiedzka D., Gibas K., Glinicki M.A., Nowowiejski G., 2011, *Wpływ dodatku popiołu lotnego wapiennego na przepuszczalność betonów w odniesieniu do mediów agresywnych*, Roads and Bridges – Drogi i Mosty, t. 10, nr 3, s. 39–61.
- Krajowa Ocena Techniczna, 2024, *GRUNT-MIX*, ITP-PIB-KOT-2024/0012, wyd. 2, Instytut Technologiczno-Przyrodniczy – Państwowy Instytut Badawczy, Falenty.
- Krajowa Ocena Techniczna, 2023, *Spoiva hydrauliczne do mieszanek stosowanych na podbudowy dróg oraz do stabilizacji podłoża „Hydrauliczne spoiwo drogowe MULTICRETE 5, Hydrauliczne spoiwo drogowe MULTICRETE 12,5, Hydrauliczne spoiwo drogowe MULTICRETE 22,5*, IBDiM-KOT-2018/0130, wyd. 2, Instytut Badawczy Dróg i Mostów, Warszawa.
- Malvern Instruments Ltd., 2007, *Mastersizer 2000 user manual (English)*. Version number: MAN0384-1-0, www.malvernpanalytical.com/en/support/product-support/mastersizer-range/mastersizer-2000 [dostęp: 1.08.2024].
- Państwowy Instytut Geologiczny – Państwowy Instytut Badawczy, 2023, *Bilans zasobów złóż kopalin w Polsce wg stanu na 31.XI.2022 r.*, www.pgi.gov.pl/aktualnosci/display/14549-bilans-zasobow-zloz-kopalin-w-polsce-wg-stanu-na-31-12-2022-r. [dostęp: 1.08.2024].
- PN-EN 13282-1:2013-07, *Hydrauliczne spoiwa drogowe – Część 1: Hydrauliczne spoiwa drogowe szybkowiązające – Skład, wymagania i kryteria zgodności*, Polski Komitet Normalizacyjny, Warszawa.

- PN-EN 13282-2:2015-06, *Hydrauliczne spoiwa drogowe – Część 2: Hydrauliczne spoiwa drogowe normalnie wiążące – Skład, wymagania i kryteria zgodności*, Polski Komitet Normalizacyjny, Warszawa.
- PN-EN 196-2:2013-11, *Metody badań cementu – Część 2: Analiza chemiczna cementu*, Polski Komitet Normalizacyjny, Warszawa.
- PN-EN 196-6:2011, *Metody badania cementu – Część 6: Oznaczanie stopnia zmielenia*, Polski Komitet Normalizacyjny, Warszawa.
- PN-EN 197-1:2012, *Cement – Część 1: Skład, wymagania i kryteria zgodności dotyczące cementów powszechnego użytku*, Polski Komitet Normalizacyjny, Warszawa.
- PN-EN 450-1:2012, *Popiół lotny do betonu – Część 1: Definicje, specyfikacje i kryteria zgodności*, Polski Komitet Normalizacyjny, Warszawa.
- PN-EN 451-2:2017-06, *Metoda badania popiołu lotnego – Część 2: Oznaczanie mialkości przez przesiewanie na mokro*, Polski Komitet Normalizacyjny, Warszawa.
- Gmina Kleszczów, 2005, *Plan Gospodarki Odpadami dla Gminy Kleszczów na lata 2004–2015 – Załącznik Gospodarka odpadami i składowiskami odpadów Elektrowni Bełchatów SA*, Uchwała Nr XL/413/05, Kleszczów.
- Szerszeń K., 2023, *Wpływ uzdatniania mechanicznego na parametry fizyczne popiołu lotnego wapiennego*, Nauka – Technika – Technologia, t. 7, Wydawnictwa AGH, Kraków, s. 123–133.



ISSN 3071-7027
ISBN 978-83-68219-20-3