

ARTYKUŁY LAUREATÓW

64.

BARBÓRKOWEJ
KONFERENCJI
STUDENCKICH
KÓŁ NAUKOWYCH
AGH



WYDAWNICTWA AGH
KRAKÓW 2024



ARTYKUŁY LAUREATÓW

64.

BARBÓRKOWEJ
KONFERENCJI
STUDENCKICH
KÓŁ NAUKOWYCH
AGH



STUDENCKIE KOŁA NAUKOWE AGH



WYDAWNICTWA AGH
KRAKÓW 2024

Wydawnictwa Akademii Górniczo-Hutniczej im. Stanisława Staszica w Krakowie

© Wydawnictwa AGH, Kraków 2024

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

ISBN 978-83-67427-86-9

ISSN 3071-7019

<https://doi.org/10.7494/978-83-67427-86-9>

Dyrektor Wydawnictw AGH:

Jan Sas

Komitet Wydawnictw AGH:

Marek Gorgoń (przewodniczący)

Barbara Gąciarz

Elżbieta Pamuła

Bogdan Sapiński

Stanisław Stryczek

Tadeusz Telejko

Redaktor naukowy tomu:

Paweł Bogacz (AGH Akademia Górniczo-Hutnicza)

Książka prezentuje artykuły naukowe, które powstały na podstawie referatów laureatów 64. Barbórkowej Konferencji Studenckich Kół Naukowych AGH z 7 grudnia 2023 roku. Wszystkie uzyskały dwie pozytywne recenzje.

Projekt okładki i strony tytułowej: *Agata Wajer-Gądecka*

W projekcie wykorzystano elementy graficzne opracowane przez *Katarzynę Szymulę*.

Opracowanie edytorskie i korekta:

Joanna Ciągała, Monika Filipek, Magdalena Grzech, Agnieszka Rusinek, Kamila Zimnicka

Skład komputerowy: MarDruk, Marcin Herzog

e-mail: biuro@mardruk.pl

Wydawnictwa AGH

al. A. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków

tel. 12 617 32 28, 12 636 40 38

www.wydawnictwo.agh.edu.pl

e-mail: redakcja@wydawnictwoagh.pl

SPIS TREŚCI

Emma Bartosik	
WPLYW WYBRANYCH PÓŁPRZEWODNIKÓW II–VI NA WŁAŚCIWOŚCI FOTOANODY TiO_2	7
Paulina Chołota	
WENTYLACJA, KLIMATYZACJA, TRANSPLANTACJA – KSZTAŁTOWANIE MIKROKLIMATU W JEDNOSTKACH ONKOLOGICZNYCH	21
Wiktor Dębicki	
INNOWACYJNE TECHNOLOGIE I MATERIAŁY WYKORZYSTYWANE PRZY PRODUKCJI CHWYTÓW WSPINACZKOWYCH	31
Adrianna Golowska, Alicja Góralczyk	
INNOWACYJNY SYSTEM ŁĄCZENIA FUNDAMENTÓW BEZPOŚREDNICH Z KONSTRUKCJAMI CEMENTOGRUNTOWYMI	51
Daria Gontarz	
MONITOROWANIE JAKOŚCI POWIETRZA W POLSCE W KONTEKŚCIE KONCEPCJI <i>SMART CITY</i>	75
Aleksandra Kornaś	
WYMAGANIA SYSTEMÓW WENTYLACJI W LABORATORIACH CHEMICZNYCH I BIOLOGICZNYCH	85
Wiktor Krzewiński	
PROJEKTOWANIE SYSTEMU CHŁODZENIA PODZESPOŁÓW SAMOCHODU ELEKTRYCZNEGO – CHŁODZENIE PASYWNE	97
Karol Kuglarz, Grzegorz Michta	
MIKROSTRUKTURA DZIESIĘCIOWARSTWOWEGO PLATERU FE ARMCO – TI GR.1 – AL 1050 PO PRZERÓBCE PLASTYCZNEJ	109
Konrad Lukaj, Karolina Kucharz	
INTERAKTYWNY MODEL FOTOGRAOMETRYCZNY JAKO NOWOCZESNE NARZĘDZIE WSPOMAGAJĄCE INTEGRACJĘ, INTERPRETACJĘ I PREZENTACJĘ DANYCH GEOLOGICZNYCH NA PRZYKŁADZIE KAMIENIOŁOMU „DROBNY”	127

Maria Migacz

ANALIZA ZNAJOMOŚCI METODOLOGII I NARZĘDZI OPTIMALIZACYJNYCH WŚRÓD PRACOWNIKÓW – <i>CASE STUDY</i>	141
---	-----

Kamil Misiurek

ŚWIADECTWA CHARAKTERYSTYKI ENERGETYCZNEJ – ANALIZA WYNIKÓW DOTYCZĄCYCH LOKALI MIESZKALNYCH Z OKRESU 1950–1990.....	151
--	-----

Mykhailo Pavliuk, Vitalii Horielov

METHODS OF CYBERATTACKS' DETECTION BASED ON NETWORK TRAFFIC ANALYSIS	161
---	-----

Julia Piestrzyńska, Kinga Firmanty

<i>JUST IN BLAST – VR TRAINING</i> – WYKORZYSTANIE TECHNOLOGII VR W GÓRNICTWIE I PRZEMYSŁE CIĘŻKIM DO PROWADZENIA SZKOLEŃ.....	171
--	-----

Klaudia Proszowska

PERCEPCJA WYKORZYSTANIA TECHNOLOGII DEEPPFAKE W MATERIAŁACH WIDEO WŚRÓD STUDENTÓW	185
--	-----

Olga Sieradzan

GDZIE NAJLEPIEJ ZOSTAĆ RODZICEM? RANKING PAŃSTW SPRZYJAJĄCYCH RODZICIELSTWU.....	201
---	-----

Igor Świerczek

OPRACOWANIE SYSTEMU TELEMETRII BOLIDU WODOROWEGO HYDRIVE 1	223
---	-----

Jakub Świerczek

ANALIZA FUNDAMENTU I KORPUSU ELEKTROWNI WIATROWEJ	233
---	-----

Sebastian Taraszkiewicz, Emilia Bentkowska, Tomasz Mitro

BADANIE OSUWISKA „STOK POD BARANEM” W REJONIE WIELICZKI ZA POMOCĄ METODY ERT.....	251
--	-----

Patryk Tokarz

ANALIZA DRGAŃ KONSTRUKCJI FUNDAMENTU POD DMUCHAWĘ CIĄGU SPALIN	267
---	-----

Jan Udaliszczew

ANALIZA EFEKTYWNOŚCI RÓŻNYCH RODZAJÓW ZIEM FILTRACYJNYCH W RAFINACJI PARAFINY NA PRZYKŁADZIE PRZEDSIĘBIORSTWA TERRA TRADE.....	289
--	-----

Patrycja Wrona, Aleksandra Brzóska, Kacper Staszal, Maciej Manecki GEOCHEMICZNA IMMOBILIZACJA PROMIENIOTWÓRCZEGO TORU: MINERALOGIA W SŁUŻBIE POLSKIEJ ATOMISTYKI.	305
Maksymilian Zarychta, Rafał Czompelik ZASTOSOWANIE OGNIWA WODOROWEGO PEM JAKO MOBILNEJ JEDNOSTKI ZASILAJĄCEJ BOLID HYDRIVE 1	315
Szymon Ziaja WPŁYW CYFRYZACJI NA NAJWAŻNIEJSZE WSKAŹNIKI EFEKTYWNOŚCI PROCESU PRODUKCYJNEGO NA PRZYKŁADZIE PROJEKTU AGH LEANLINE.	327
Zbigniew Jan Ziarek NARZĘDZIE GEOEDUKACYJNE NA POTRZEBY GEOTURYSTYKI – STUDIUM SEDYMENTOLOGICZNEGO MODELOWANIA PRĄDU ZAWIESINOWEGO	341

Emma Bartosik*

WPŁYW WYBRANYCH PÓŁPRZEWODNIKÓW II–VI NA WŁAŚCIWOŚCI FOTOANODY TiO_2

W artykule przedstawiono wyniki badań optycznych i prądowo-napięciowych heterostruktur półprzewodnikowych na bazie TiO_2 . W celu ich wytworzenia zastosowano osadzanie CdS z użyciem metody SILAR (*successive ionic layer adsorption and reaction*) oraz CdSe, wykorzystując metodę CBD (*chemical bath deposition*). Wyznaczono charakterystyki spektralne i prądowo-napięciowe oraz prądowo-czasowe w ogniwie pod oświetleniem. Określono energię przerwy wzbronionej uzyskanych heterostruktur przy użyciu dwóch metod: na podstawie funkcji Kubelki–Munka i metodą różniczkową. Wyznaczono wydajność konwersji energii, potencjał płaskich pasm i gęstość prądu nasycenia. Zaobserwowano zależność między liczbą cykli SILAR a natężeniem fotoprądu. Wykazano, że tworzenie heterostruktur znacząco wpływa na pracę fotoanody i umożliwia obniżenie energii przerwy wzbronionej o około 1,0 eV, przesuując krawędź absorpcji w kierunku zakresu światła widzialnego.

INFLUENCE OF CHOSEN II–VI SEMICONDUCTORS ON THE PROPERTIES OF THE TiO_2 PHOTOANODE

The article presents results of optical and current-voltage measurements of the semiconductor heterostructures based on TiO_2 . Photoelectrodes were prepared by CdS deposition with the SILAR method and CdSe using the CBD method. The spectral, current-voltage and current-time characteristics of photoelectrodes under illumination were examined. The band gap energy of the obtained heterostructures was determined using two methods: based on the Kubelka–Munk function and the differential method. The energy conversion efficiency, flat band potential and saturation photocurrent density values were calculated. A correlation between the number of SILAR cycles and the photocurrent was observed. Sensitization of CdS and CdSe significantly affects the performance of TiO_2 photoanode and allows the reduction of the band gap energy by approximately 1,0 eV, thereby shifting the absorption edge towards the visible light range.

* AGH Akademia Górniczo-Hutnicza, Wydział Inżynierii Materiałowej i Ceramiki, Studenckie Koło Naukowe AGH Eko-Energia.

1. WSTĘP

W obliczu zmian klimatycznych istotne jest zastąpienie paliw kopalnych alternatywami neutralnymi dla środowiska. Wodór może być stosowany jako nośnik energii ze względu na łatwą dostępność, czystość oraz możliwość konwersji gromadzonej energii w inne jej formy [1]. Produkcja wodoru odbywa się najczęściej przy użyciu technologii takich jak reforming parowy, fermentacja biomasy, piroliza metanu i zgazowanie. Ponadto wodór można przechowywać w różnych postaciach i transportować na długie dystanse oraz odznacza się wysoką wydajnością konwersji energii. Najbardziej przyjazne dla środowiska jest wytwarzanie wodoru z użyciem odnawialnych źródeł energii – geotermalnej, wiatrowej czy słonecznej. W przypadku stosowania energii słonecznej produkcja wodoru w ogniwie fotoelektrochemicznym (PEC – *photoelectrochemical cell*) wiąże się z mniejszą emisją zanieczyszczeń w porównaniu do innych metod wytwarzania. W tego typu ogniwie energia słoneczna ulega przekształceniu w nośnik energii w wyniku procesów elektrochemicznych stymulowanych światłem słonecznym, które jest absorbowane przez elektrodę bądź elektrody zanurzone w ciekłym elektrolicie. Kluczowe jest zastosowanie elektrody z półprzewodnika o właściwym ułożeniu pasm walencyjnego i przewodnictwa. W przypadku półprzewodników typu p nośnikami ładunku są dziury elektronowe w paśmie walencyjnym, co skutkuje łatwą redukcją. W półprzewodnikach typu n tę rolę pełnią elektrony w paśmie przewodnictwa. Reakcja fotoelektrochemiczna polega na generowaniu nośników ładunku poprzez absorpcję fotonów, których energia jest wyższa od energii przerwy wzbronionej półprzewodnika. W ten sposób następuje konwersja energii. Właściwości fizykochemiczne półprzewodników oraz procesy takie jak absorpcja światła, separacja, transport i rekombinacja nośników ładunków wpływają na właściwości fotokatalityczne materiałów. Od czasu publikacji artykułu dotyczącego fotoelektrochemicznego rozkładu wody z wykorzystaniem dwutlenku tytanu (TiO_2) jako fotoelektrody wiele badań zostało poświęconych materiałom fotokatalitycznym służącym konwersji energii słonecznej do wodoru [2]. Aby materiał mógł być fotokatalizatorem, musi cechować się m.in. wysoką stabilnością i aktywnością katalityczną, absorpcją światła z szerokiego zakresu spektralnego i odpowiednim położeniem pasm energetycznych. Najczęściej stosowanymi fotokatalizatorami są m.in. TiO_2 , ZnO , CdS , Fe_2O_3 , BiVO_4 . Niektóre półprzewodniki mają odpowiednie pasma wzbronione, lecz ulegają fotokorozji i nie są stabilne w środowisku utleniającym. W celu poprawy stabilności stosuje się różne zabiegi, m.in. pokrywanie elektrod cienkimi warstwami np. węgla [3]. TiO_2 jest szeroko badany pod kątem użycia w PEC, lecz szerokość przerwy wzbronionej (3,2 eV) ogranicza absorpcję światła do zakresu UV (ultrafioletu). Modyfikacja fotoanod TiO_2 umożliwia rozszerzenie spektrum absorpcji. W tym celu stosuje się kilka podejść, m.in. domieszkowanie, modyfikację mikrostruktury czy tworzenie heterostruktur. Domieszkowanie można przeprowadzać z użyciem metali bądź niemetalu – zbadano m.in. domieszkowanie nanodrutów TiO_2 z użyciem jonów cyny [4], żelaza [5] czy niklu [6]. Obecność jonów metali przejściowych wpływa na szybkość rekombinacji nośników ładunku i fotoreaktywność. Modyfikacja mikrostruktury fotoelektrod (0D, 1D, 2D, 3D) skutkuje zwiększoną reaktywnością, ponieważ nanomateriały cechują się znacznie większymi wartościami powierzchni właściwej w porównaniu z tradycyjnymi materiałami. Ponadto przejście do skali nano skutkuje zmianami właściwości optycznych, elektrycznych czy magnetycznych. Wykazano, że zastosowanie nanostruktur 3D w postaci nanokwiatów TiO_2 skutkuje większą aktywnością fotokatalityczną, a porowata morfologia – efektywną absorpcją światła [7].

2. CEL PRACY

Celem pracy było wytworzenie heterostruktur półprzewodnikowych TiO_2/CdS , TiO_2/CdSe oraz $\text{TiO}_2/\text{CdS}/\text{CdSe}$ i przeanalizowanie ich właściwości nanometrycznych pod kątem możliwości zastosowania jako fotoanod w ogniwie fotoelektrochemicznym do produkcji wodoru. Wytworzenie heterostruktury TiO_2/CdS powoduje przesunięcie krawędzi absorpcji (poniżej 520 nm) ze względu na energię przerwy wzbronionej CdS, wynoszącą 2,3 eV. CdSe cechuje szerszy zakres absorpcji (poniżej 720 nm), lecz jego krawędź pasma przewodnictwa znajduje się poniżej pasma TiO_2 , przez co wydajność wstrzykiwania ładunków jest mniejsza niż w przypadku CdS [8]. Wzajemne położenie pasm w układzie TiO_2/CdS , TiO_2/CdSe oraz $\text{TiO}_2/\text{CdS}/\text{CdSe}$ powoduje, że generowane nośniki ładunków ulegają separacji i maleje ryzyko rekombinacji. Pomimo osiągnięcia obiecujących wyników niezbędne są dalsze prace nad wytwarzaniem materiałów i heterostruktur. Istotne jest przezwyciężenie problemów związanych ze skalowaniem, produkcją, stabilnością i wydajnością.

3. MATERIAŁY I METODY

3.1. MATERIAŁY

Zastosowano następujące materiały i odczynniki: Na_2SeSO_3 (99,9%, POCH, Polska), $\text{Cd}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ (99,9%, ACROS, USA), $\text{Na}_2\text{S} \cdot 9\text{H}_2\text{O}$ (99,9%, POCH, Polska), utleniona blaszka tytanowa (99,7%, Sigma-Aldrich, USA).

3.2. METODY EKSPERYMENTALNE

Depozycja CdS

W celu osadzenia CdS zastosowano metodę SILAR (*successive ionic layer adsorption and reaction*), czyli adsorpcję i reakcję kolejnych warstw jonowych. Jest to metoda stosowana w celu osadzania cienkich warstw poprzez kolejne zanurzanie podłoża w kationowych i anionowych roztworach prekursorów [9]. Za jej użyciem przemawia jej prostota i fakt, że pozwala na otrzymywanie warstw w niskiej temperaturze przy minimalnych stratach odczynników. Ponadto można kontrolować typy prekursorów i rozpuszczalników, szybkość osadzania i grubość warstw. Nie ma również ograniczeń co do wymiarów i rodzaju podłoża. Możliwe jest osadzanie pojedynczych nanocząstek i cienkich filmów, których grubość wynosić może od kilku nanometrów do rozmiarów mikrometrycznych. Przeprowadzono osadzanie składające się z czterech cykli. Pierwszy z nich obejmował zanurzenie utlenionej blaszki tytanowej w wodnym roztworze prekursora jonów Cd^{2+} ($\text{Cd}(\text{NO}_3)_2$ o stężeniu 0,01 M). Dalej podłoże zanurzano w wodzie destylowanej w celu pozbycia się słabo związanych jonów. Następnie blaszkę umieszczano w wodnym prekursorze jonów S^{2-} (Na_2S o stężeniu 0,01 M). Na tym etapie następowało osadzenie jonów S^{2-} i zachodziła reakcja pomiędzy kationami i anionami, w wyniku której powstawał CdS. Ostatnim etapem było zanurzenie w wodzie destylowanej. Każdy z etapów trwał 30 s, a podczas depozycji roztwory mieszano przy użyciu mieszadła magnetycznego przy stałej temperaturze 23°C. Liczba wykonanych cykli to pięć oraz piętnaście.

Depozycja CdSe

Do osadzenia CdSe wykorzystano metodę CBD (*chemical bath deposition*), czyli osadzania z kąpeli wodnej. Wymieszano równe objętości roztworów zawierających prekursorzy jonów Cd^{2+} i Se^{2-} o stężeniu 0,01 M (wodne roztwory odpowiednio $\text{Cd}(\text{NO}_3)_2$ i Na_2SeSO_3). Podłoże zanurzone w wykonanym roztworze na 1 h, całość mieszając przy użyciu mieszadła magnetycznego. Przygotowano pięć próbek: TiO_2 , TiO_2/CdS – o dwóch różnych liczbach cykli SILAR – pięć i piętnaście TiO_2/CdSe oraz $\text{TiO}_2/\text{CdS}/\text{CdSe}$ (CdS osadzone w piętnastu cyklach). Właściwości optyczne określono przez zbadanie reflektancji $R(\lambda)$ próbek za pomocą spektrofotometru UV-VIS-NIR (Jasco V-670, Japonia) w zakresie długości fali 220–2200 nm z krokiem 0,5 nm. Energię przerwy wzbronionej E_g wyznaczono za pomocą funkcji Kubelki–Munka [10] i metodą różniczkową.

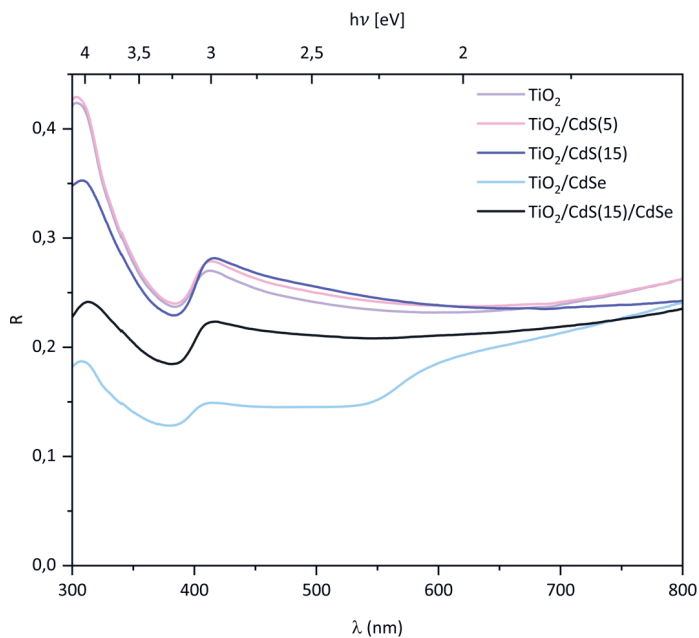
Charakterystyki prądowo-napięciowe i prądowo-czasowe wyznaczono w zakresie UV-VIS-IR w ogniwie fotoelektrochemicznym w roztworze 0,8 M Na_2SO_4 . Zastosowano układ trójelektrodowy, z przeciwielektrodą w postaci elektrody platynowej i standardową elektrodą kalomelową jako elektrodą odniesienia. Wykorzystano potencjostat Interface 1010 (Gamry Instruments, USA) oraz lampę ksenonową o intensywności światła białego 107,1 $\text{mW}\cdot\text{cm}^{-2}$. Na podstawie charakterystyk wyznaczono potencjał płaskich pasm, wydajność konwersji energii i gęstość prądu nasycenia.

4. WYNIKI

4.1. WŁAŚCIWOŚCI OPTYCZNE

Na rysunku 1 zaobserwować można wpływ utworzenia heterostruktur na krawędź absorpcji. Z analizy zależności współczynnika odbicia od długości fali wynika, że współczynnik odbicia osiąga najwyższe wartości w zakresie światła UV i maleje, osiągając lokalne minimum przy ok. 400 nm, kiedy to zaczyna rosnąć w każdej z próbek. Wskazuje to na obecność krawędzi absorpcji w zakresie światła UV, które pochodzą od TiO_2 . W przypadku heterostruktury TiO_2/CdSe zaobserwować można dwie podstawowe krawędzie absorpcji – w zakresie światła UV przy ok. 400 nm (TiO_2) i w zakresie światła widzialnego przy ok. 550 nm związaną z CdSe. W próbce $\text{TiO}_2/\text{CdS}(15)/\text{CdSe}$ nie jest obserwowana druga krawędź absorpcji – wnioskuje się, że CdSe miał trudność z osadzeniem się na CdS, w wyniku czego obecna jest jedynie krawędź w zakresie światła UV. Nie zaobserwowano krawędzi absorpcji od CdS w przypadku $\text{TiO}_2/\text{CdS}(5)$, $\text{TiO}_2/\text{CdS}(15)$ i $\text{TiO}_2/\text{CdS}(15)/\text{CdSe}$ – wnioskuje się, że liczba cykli SILAR była niewystarczająca dla właściwego osadzenia. Energia przerwy wzbronionej (E_g) heksagonalnego CdS wynosi 2,42 eV, a w układzie regularnym $E_g = 2,5$ eV, co odpowiada krawędzi absorpcji przy λ ok. 500 nm [11].

Energie przerwy wzbronionej wyznaczono metodą różniczkową jako ekstrema $dR/d\lambda$ (rys. 2) i zestawiono w tabeli 1. Energia E_g TiO_2 wyznaczona z $dR/d\lambda$ wyniosła 3,10 eV i jest niższa od wartości literaturowej (E_g anatazu to 3,20 eV [12]). W przypadku $\text{TiO}_2/\text{CdS}(5)$ E_g ma wartość 3,09 eV, a dla $\text{TiO}_2/\text{CdS}(15)$ wynosi 3,08 eV. Liczba cykli SILAR była niewystarczająca do zmniejszenia energii przerwy wzbronionej. Pomyślnie przebiegło osadzanie CdSe na podłożu z TiO_2 , ponieważ wyznaczona energia przerwy wzbronionej jest niższa niż w przypadku niemoodyfikowanego TiO_2 i wynosi 2,16 eV. Energia przerwy wzbronionej CdSe jest zależna od wielkości cząstek i może się znaleźć w zakresie 1,7–2,4 eV ze względu na zachodzący kwantowy efekt rozmiarowy. Uzyskana E_g heterostruktury TiO_2/CdSe odpowiada danym literaturowym [13].



Rys. 1. Widma refleksyjności fotoelektrod

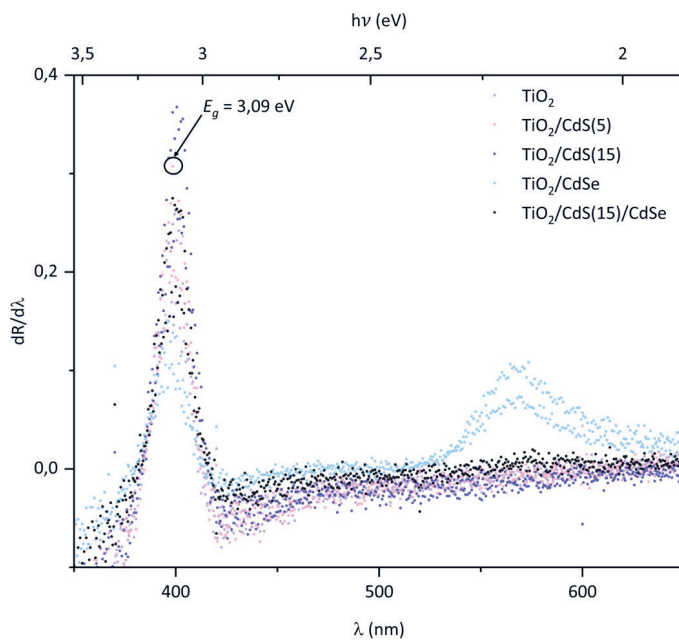
Rys. 2. Wyznaczona różniczka $dR/d\lambda$ próbek
(z zaznaczoną energią przerwy wzbronionej E_g $\text{TiO}_2/\text{CdS}(5)$)

Tabela 1. Uzyskane wartości energii przerwy wzbronionej przy użyciu metody różniczki i na podstawie funkcji Kubelki–Munka

	Fotoelektroda	TiO ₂	TiO ₂ /CdS(5)	TiO ₂ /CdS(15)	TiO ₂ /CdSe	TiO ₂ /CdS(15)/CdSe
E_g [eV]	$dR/d\lambda$	3,10	3,09	3,08	2,16	3,03
	$(K_M \cdot hv)^{\frac{1}{2}}$	3,04	3,02	3,01	2,11	3,02

Dalej wyznaczono energie przerwy wzbronionej za pomocą funkcji Kubelki–Munka, która łączy absorpcję i rozpraszanie:

$$K_M(R) = \frac{(1-R)^2}{2R} = \frac{K}{S} \quad (1)$$

gdzie:

- $K_M(R)$ – funkcja Kubelki–Munka [–],
- R – refleksyjność próbki o nieskończonej grubości [–],
- K – współczynnik absorpcji [–],
- S – współczynnik rozpraszania [–].

Jan Tauc opracował metodę szacowania energii pasma wzbronionego półprzewodników amorficznych przy użyciu widm absorpcji optycznej [14]. Zakłada ona następującą zależność współczynnika absorpcji α od E_g :

$$(\alpha \cdot hv)^{\frac{1}{y}} = B(hv - E_g) \quad (2)$$

gdzie:

- α – współczynnik absorpcji [–],
- h – stała Plancka [$J \cdot s^{-1}$],
- ν – częstotliwość fotonu [s^{-1}],
- E_g – energia przerwy wzbronionej [eV],
- B – stała proporcjonalności niezależna od energii fotonu [–],
- y – współczynnik o wartości zależnej od charakteru przejścia optycznego [–].

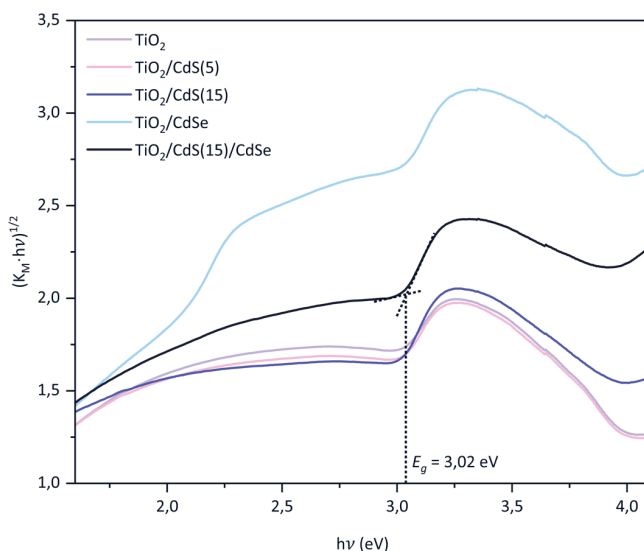
Dzięki zależności Kubelki–Munka (1) umożliwiającą przekształcenie widm odbicia w widma absorpcji równanie (2) można zapisać w postaci:

$$(K_M(R) \cdot hv)^{\frac{1}{y}} = B(hv - E_g) \quad (3)$$

gdzie:

- $K_M(R)$ – funkcja Kubelki–Munka [–],
- R – refleksyjność [–],
- h – stała Plancka [$J \cdot s^{-1}$],
- ν – częstotliwość fotonu [s^{-1}],
- E_g – energia przerwy wzbronionej [eV],
- B – stała proporcjonalności niezależna od energii fotonu [–],
- y – współczynnik o wartości zależnej od zachodzącego przejścia optycznego [–].

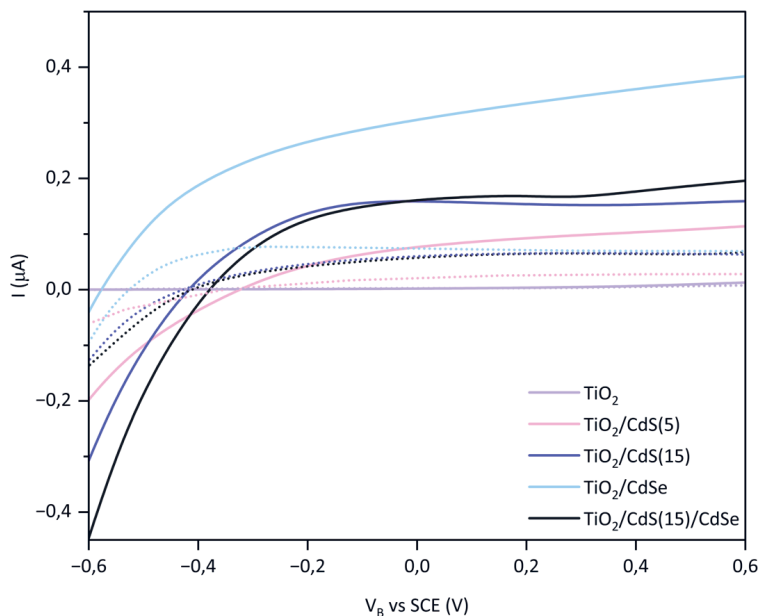
Wartości energii przerwy wzbronionej wyznaczono na podstawie przekształconego równania Tauca (3). Zastosowano współczynnik $\gamma = 2$ ze względu na zachodzące przejście dozwolone skośne. Energię przerwy wzbronionej E_g otrzymano przez wyznaczenie przegięć krzywych $(K_M \cdot hv)^{1/2}$ wykreślonych względem hv (rys. 3). Wyznaczone na podstawie rysunku 3 wartości przedstawiono w tabeli 1. Zestawienie ze sobą wyników wyznaczania energii przerwy wzbronionej dwiema metodami pozwala na stwierdzenie, że osadzony CdS nie przesunął krawędzi absorpcji. Tworzenie heterostruktur z TiO_2 i CdSe pozwala na pomyślne zmniejszenie E_g z 3,10 eV do ok. 2,15 eV. Wartości uzyskiwane na podstawie funkcji Kubelki–Munka są niższe niż otrzymywane metodą różniczkową w przypadku każdej z próbek.



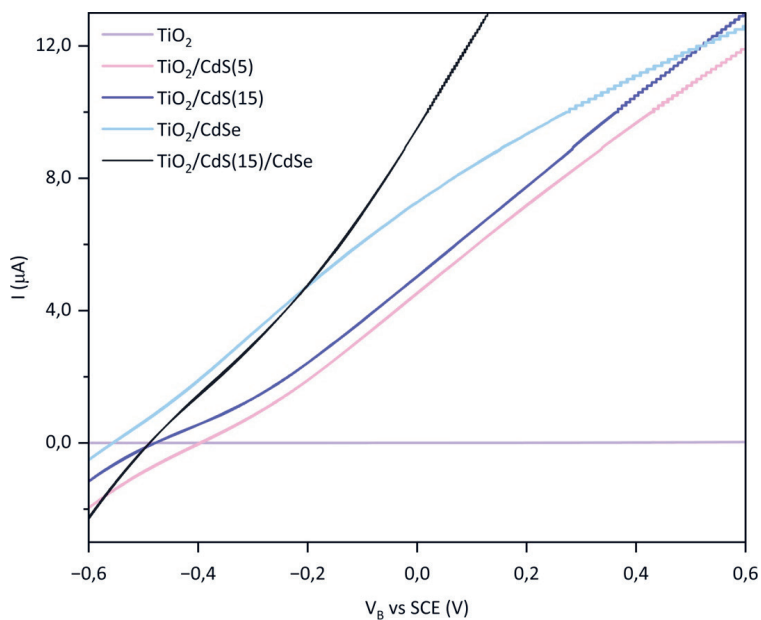
Rys. 3. Analiza energii przerwy wzbronionej na podstawie funkcji Kubelki–Munka (z zaznaczoną energią przerwy wzbronionej $\text{TiO}_2/\text{CdS}(15)/\text{CdSe}$)

4.2. WŁAŚCIWOŚCI FOTOELEKTROCHEMICZNE

Heterostruktury przetestowano jako fotoanody w ogniwie fotoelektrochemicznym. Badania prądowo-napięciowe przeprowadzano bez oświetlenia oraz pod oświetleniem światłem białym i o długości fali 370 nm (w zakresie UV). Zbadano wpływ osadzania CdS i CdSe na odpowiedzi prądowe TiO_2 . Na rysunku 4 ukazano charakterystyki pod oświetleniem światłem białym i bez oświetlenia (w prądzie ciemnym), a na rysunku 5 pod oświetleniem światłem UV. Na podstawie wykresów na rysunkach 4 i 5 wyznaczono wartości potencjału płaskich pasm V_{FB} , czyli potencjału, dla którego osiągnięta jest wartość 0 A fotoprądu. Jest on istotny podczas charakteryzowania fotoelektrody – określa potencjał elektrody, przy którym następuje zanik przypowierzchniowej bariery potencjału. Uzyskane wartości przedstawione w tabeli 2 są ujemne, z czego można wnioskować, że tempo zachodzącej rekombinacji nośników ładunku powinno być niskie. Wytworzenie heterostruktur umożliwiło efektywniejszą separację nośników ładunku. Bezwzględne wartości V_{FB} są niższe w przypadku oświetlania białym światłem.



Rys. 4. Charakterystyki prądowo-napięciowe TiO_2 przed procesami osadzania i po nich pod oświetleniem światłem białym (linia ciągła) i w prądzie ciemnym (linia przerywana)



Rys. 5. Charakterystyki prądowo-napięciowe TiO_2 przed procesami osadzania i po nich pod oświetleniem światłem UV (370 nm)

Tabela 2. Porównanie wartości potencjału płaskich pasm pod oświetleniem światłem białym i o długości fali 370 nm (UV) dla zbadanych fotoanod

	TiO ₂	TiO ₂ /CdS(5)	TiO ₂ /CdS(15)	TiO ₂ /CdSe	TiO ₂ /CdS(15)/CdSe
V_{FB} [V] (białe światło)	–0,10	–0,33	–0,42	–0,58	–0,38
V_{FB} [V] (UV)	–0,11	–0,39	–0,48	–0,56	–0,49

Wartości potencjału płaskich pasm są wrażliwe na skład heterostruktur. Najmniej ujemną wartością potencjału płaskich pasm charakteryzuje się niemodyfikowany TiO₂, a największą – heterostruktura TiO₂/CdSe. Wartości uzyskiwane dla TiO₂/CdS(15) i TiO₂/CdS(15)/CdSe są zbliżone, co pokazano w tabeli 2. Potwierdza to wcześniejsze wnioski, że osadzenie CdSe na heterostrukturze z TiO₂ i CdSe po piętnastu cyklach SILAR było utrudnione. Tworzenie heterostruktur wpłynęło pozytywnie na odpowiedzi prądowe – uzyskany fotoprąd jest znacząco wyższy w porównaniu do niemodyfikowanego TiO₂. Zwiększenie liczby cykli SILAR z pięciu do piętnastu skutkuje zwiększeniem uzyskanego fotoprądu heterostruktury TiO₂/CdSe.

Wydajność konwersji energii słonecznej wyznaczono na podstawie wzoru (4) dzięki charakterystykom prądowo-napięciowym (rys. 4):

$$\eta = \frac{I_{ph}(1,23 - V_B)}{P \cdot S} \quad (4)$$

gdzie:

η – wydajność konwersji energii [–],

V_B – przyłożone napięcie [V],

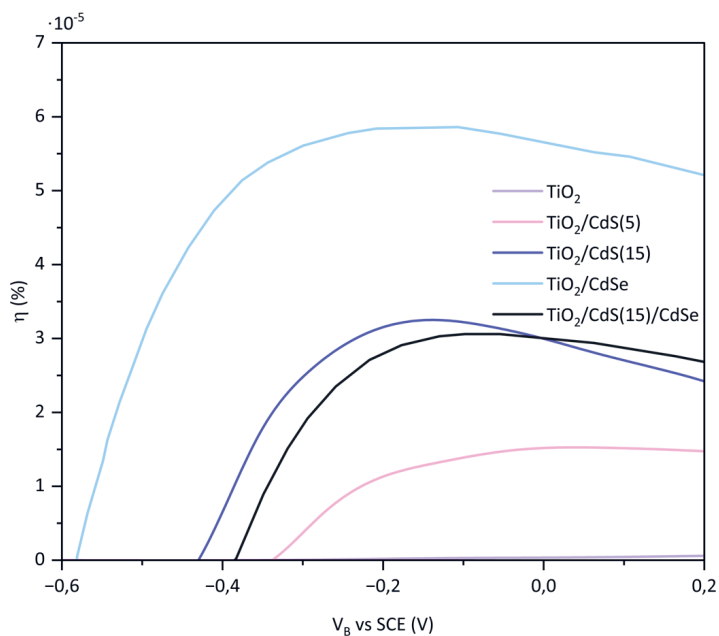
I_{ph} – uzyskany fotoprąd (natężenie płynącego prądu pod oświetleniem światłem białym) [A],

P – gęstość mocy padającego światła [$\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$],

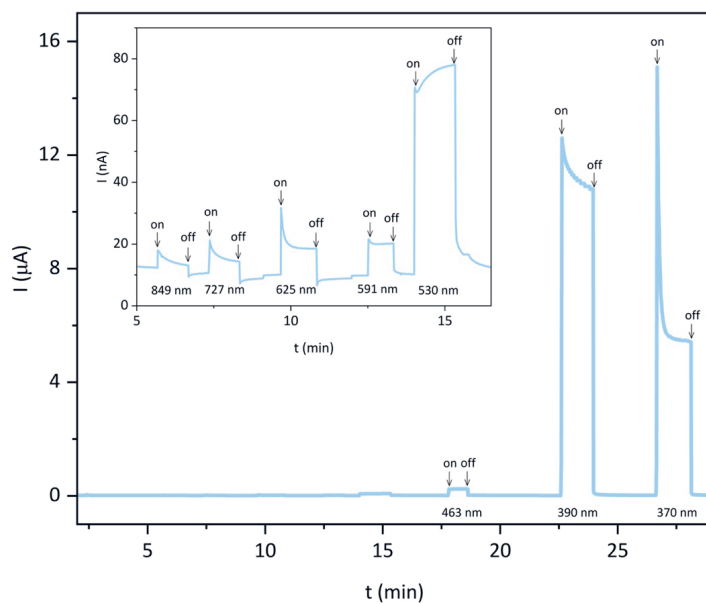
S – pole powierzchni oświetlanej elektrody [m^2].

Wartości wyliczone przy użyciu wzoru (4) przedstawiono na rysunku 6. Za maksymalną wartość wydajności konwersji przyjęto maksima uzyskanych krzywych. Najwyższe wartości wydajności konwersji uzyskała heterostruktura TiO₂/CdSe ($5,9 \cdot 10^{-5}\%$), a najniższe – niemodyfikowany TiO₂ ($0,18 \cdot 10^{-5}\%$). Zwiększenie liczby cykli SILAR z pięciu do piętnastu poskutkowało ponad dwukrotnym wzrostem wydajności, z $1,52 \cdot 10^{-5}\%$ do $3,25 \cdot 10^{-5}\%$. W przypadku TiO₂/CdS(15)/CdSe maksymalna wartość η wynosi $3,07 \cdot 10^{-5}\%$ i jest zbliżona do wydajności konwersji TiO₂/CdS(15).

Wykonano pomiary prądowo-czasowe przygotowanych fotoelektrod oświetlanych światłem monochromatycznym z zakresu UV-VIS-NIR (0 V vs SCE). Na rysunku 7 pokazano uzyskaną charakterystykę prądowo-czasową heterostruktury TiO₂/CdSe, ukazującą również schemat postępowania podczas pomiarów. Oświetlenie fotoanody skutkuje drastycznym wzrostem wartości fotoprądu, a wyłączenie oświetlenia powoduje natychmiastowy spadek wartości. Wysoka wartość fotoprądu wskazuje na skuteczne generowanie nośników ładunku, a następujący spadek – na zachodzenie częściowej rekombinacji par elektron–dziura.



Rys. 6. Zależność wydajności konwersji energii od przyłożonego napięcia



Rys. 7. Charakterystyki prądowo-czasowe heterostruktuury TiO_2/CdSe oświetlanej światłem o podanych na wykresie długościach fali (*on* – moment włączenia źródła światła, *off* – moment wyłączenia światła)

Na podstawie uzyskanych danych wyznaczono gęstość prądu nasycenia (znormalizowaną do gęstości mocy lampy). Wyniki zebrano w tabeli 3. Najwyższe wartości uzyskano dla światła z zakresu UV, co potwierdza poprzednie wnioski płynące z analizy charakterystyk spektralnych. Najwyższymi wartościami gęstości prądu nasycenia odznacza się heterostruktura $\text{TiO}_2/\text{CdS}(15)/\text{CdSe}$ oraz TiO_2/CdSe . Zwiększenie liczby cykli SILAR z pięciu do piętnastu skutkuje znaczącą, pozytywną zmianą w otrzymanych wartościach I_{ph}/P . Jednocześnie zaobserwowano wysoką stabilność fotoanod, które testowane były przez ponad 25 min.

Tabela 3. Gęstości prądu nasycenia fotoanod

λ [nm]	I_{ph}/P [$\text{A} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{W}^{-1}$]				
	TiO_2	$\text{TiO}_2/\text{CdS}(5)$	$\text{TiO}_2/\text{CdS}(15)$	TiO_2/CdSe	$\text{TiO}_2/\text{CdS}(15)/\text{CdSe}$
849	$1,4 \cdot 10^{-9}$	$6,9 \cdot 10^{-8}$	$5,3 \cdot 10^{-7}$	$2,2 \cdot 10^{-7}$	$5,5 \cdot 10^{-7}$
727	$1,0 \cdot 10^{-9}$	$9,9 \cdot 10^{-8}$	$1,5 \cdot 10^{-7}$	$3,2 \cdot 10^{-7}$	$2,2 \cdot 10^{-7}$
625	$1,2 \cdot 10^{-10}$	$8,7 \cdot 10^{-8}$	$1,4 \cdot 10^{-7}$	$3,5 \cdot 10^{-7}$	$2,0 \cdot 10^{-7}$
591	$7,9 \cdot 10^{-10}$	$2,0 \cdot 10^{-7}$	$3,2 \cdot 10^{-7}$	$9,7 \cdot 10^{-7}$	$2,6 \cdot 10^{-7}$
530	$2,0 \cdot 10^{-9}$	$4,4 \cdot 10^{-7}$	$7,0 \cdot 10^{-7}$	$2,9 \cdot 10^{-6}$	$9,8 \cdot 10^{-7}$
463	$4,0 \cdot 10^{-9}$	$1,1 \cdot 10^{-6}$	$9,2 \cdot 10^{-7}$	$2,9 \cdot 10^{-6}$	$2,3 \cdot 10^{-6}$
390	$1,3 \cdot 10^{-8}$	$9,8 \cdot 10^{-5}$	$1,0 \cdot 10^{-4}$	$1,3 \cdot 10^{-4}$	$1,9 \cdot 10^{-4}$
370	$2,8 \cdot 10^{-8}$	$7,3 \cdot 10^{-5}$	$1,5 \cdot 10^{-4}$	$1,9 \cdot 10^{-4}$	$2,8 \cdot 10^{-4}$

5. PODSUMOWANIE

Heterostruktury utworzono przez osadzenie związków kadmu przy użyciu dwóch metod: CdS metodą SILAR i CdS przez osadzanie z kąpeli chemicznej. Liczba cykli SILAR była niewystarczająca, aby zarejestrować znaczącą zmianę krawędzi absorpcji. Możliwe, że CdSe miał trudności z osadzaniem się na $\text{TiO}_2/\text{CdS}(15)$.

Wytworzenie heterostruktury TiO_2/CdSe pozwoliło na przesunięcie krawędzi absorpcji TiO_2 . Krawędź absorpcji TiO_2 jest obserwowana w zakresie 350–450 nm, a w przypadku TiO_2/CdSe – w zakresie 500–600 nm. Tym samym zmniejszono energię przerwy wzbronionej o ok. 1,0 eV w stosunku do niemodyfikowanego TiO_2 . Absorpcja światła z zakresu UV stanowiącego 3–6% promieniowania słonecznego ogranicza możliwości produkcji wodoru w ogniwie fotoelektrochemicznym przez niemodyfikowany TiO_2 . Węższa przerwa wzbroniona heterostruktury (uzyskana wartość energii przerwy wzbronionej to ok. 2,15 eV dla TiO_2/CdSe) pozwala na przesunięcie krawędzi absorpcji w kierunku światła widzialnego, do ok. 550 nm. Tym samym udowodniono celowość tworzenia heterostruktur.

Potencjał płaskich pasm to kluczowy parametr charakteryzujący fotoelektrody. Użyty TiO_2 wykazywał się niską bezwzględną wartością potencjału płaskich pasm. Wytworzenie heterostruktury TiO_2/CdSe zwiększyło wartość V_{FB} blisko sześciokrotnie, a osadzenie CdS – o 330% i 420% przy odpowiednio pięciu i piętnastu cyklach. Dalsze badania skupią się na zwiększeniu liczby cykli, by określić zależność między liczbą cykli a właściwościami fotoelektrochemicznymi. Wyższe wartości bezwzględne V_{FB} otrzymano przy oświetlaniu fotoanod światłem ultrafioletowym. Najwyższymi wartościami fotoprądu charakteryzuje się TiO_2/CdSe . Wartości fotoprądu i przebieg charakterystyk prądowo-napięciowych $\text{TiO}_2/\text{CdS}(15)$ i $\text{TiO}_2/\text{CdS}(15)/\text{CdSe}$ są do siebie zbliżone. Potwierdza to wysuniętą wcześniej tezę, że CdSe miał trudność w osadzeniu się na podłożu z $\text{TiO}_2/\text{CdS}(15)$. Obecność CdS na podłożu TiO_2 spowodowała ograniczenie adsorpcji.

Gęstość prądu nasycenia to wielkość wynikająca z mechanizmów rekombinacyjnych podczas oświetlania fotoanod. W przypadku oświetlania ich światłem z zakresu widzialnego i bliskiej podczerwieni uzyskiwany fotoprąd był niski, lecz jednocześnie charakteryzował się niższymi spadkami wartości. Najwyższe wartości fotoprądu osiągnęto przy oświetlaniu światłem z zakresu UV, lecz w tym zakresie światła nośniki ładunku ulegały znaczącej rekombinacji. Heterostruktura $\text{TiO}_2/\text{CdS}(15)/\text{CdSe}$ ma najwyższe wartości I_{ph}/P . Obecne wyniki pokazują, że efektywność konwersji energii słonecznej można zwiększyć przez współuczulanie CdS i CdSe – osiągnięto zwiększenie wartości I_{ph}/P nawet o 4 rzędy wielkości w stosunku do niemodyfikowanego TiO_2 .

Przedstawiane badania udowodniły możliwość zwiększenia wydajności konwersji przez tworzenie heterostruktur. Dalsze badania skupią się na zwiększaniu stężenia prekursorów i liczby cykli SILAR oraz analizie wpływu procesu osadzania na parametry pracy fotoelektrod.

LITERATURA

- [1] Dincer I., Acar C., *A review on clean energy solutions for better sustainability*, International Journal of Energy Research, vol. 39, iss. 5, 2015, s. 585–606, <https://doi.org/10.1002/er.3329>.
- [2] Fujishima A., Honda K., *Electrochemical photolysis of water at a semiconductor electrode*, Nature, vol. 238, no. 5358, 1972, s. 37–38, <https://doi.org/10.1038/238037a0>.
- [3] Kunturu P.P., Huskens J., *Efficient solar water splitting photocathodes comprising a copper oxide heterostructure protected by a thin carbon layer*, ACS Applied Energy Materials, vol. 2, iss. 1, 2019, s. 7850–7860, <https://doi.org/10.1021/acsaem.9b01290>.
- [4] Xu M., Da P., Wu H., Zhao D., Zheng G., *Controlled Sn-doping in TiO_2 nanowire photoanodes with enhanced photoelectrochemical conversion*, Nano Letters, vol. 12, iss. 3, 2012, s. 1503–1508, <https://doi.org/10.1021/nl2042968>.
- [5] Singh A.P., Kumari S., Shrivastav R., Dass S., Satsangi V.R., *Iron doped nanostructured TiO_2 for photoelectrochemical generation of hydrogen*, International Journal of Hydrogen Energy, vol. 33, iss. 20, 2008, s. 5363–5368, <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2008.07.041>.
- [6] Gracia F., Holgado J.P., Caballero A., Gonzalez-Eliphe A.R., *Structural, optical, and photoelectrochemical properties of $M^{n+}-\text{TiO}_2$ model thin film photocatalysts*, The Journal of Physical Chemistry B, vol. 108, iss. 45, 2004, s. 17466–17476, <https://doi.org/10.1021/jp0484938>.

- [7] Kusior A., Wnuk A., Trenczek-Zajac A., Zakrzewska K., Radecka M., *TiO₂ nanostructures for photoelectrochemical cells (PECs)*, International Journal of Hydrogen Energy, vol. 40, iss. 14, 2015, s. 4936–4944, <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2015.01.103>.
- [8] Lee Y.L., Chi Ch.F., Liao S.Y., *CdS/CdSe co-sensitized TiO₂ photoelectrode for efficient hydrogen generation in a photoelectrochemical cell*, Chemistry of Materials, vol. 22, no. 3, 2009, s. 922–927, <https://doi.org/10.1021/cm901762h>.
- [9] Pathan H.M., Lokhande C.D., *Deposition of metal chalcogenide thin films by successive ionic layer adsorption and reaction (SILAR) method*, Bulletin of Materials Science, vol. 27, iss. 2, 2004, s. 85–11, <https://doi.org/10.1007/bf02708491>.
- [10] Kubelka P., Munk F., *Ein Beitrag zur Optik der Farbanstriche*, Zeitschrift für Technische Physik, vol. 12, 1931, s. 593–601.
- [11] Trenczek-Zajac A., Kusior A., Radecka M., *CdS for TiO₂-based heterostructures as photoactive anodes in the photoelectrochemical cells*, International Journal of Hydrogen Energy, vol. 41, iss. 18, 2016, s. 7548–7562, <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2015.12.219>.
- [12] Dette Ch., Pérez-Osorio M.A., Kley Ch.S., Punke P., Patrick Ch.E., Jacobson P., Giustino F., Jung S.J., Kern K., *TiO₂ anatase with a bandgap in the visible region*, Nano Letters, vol. 14, iss. 11, 2014, s. 6533–6538, <https://doi.org/10.1021/nl503131s>.
- [13] Erni R., Browning N.D., *Quantification of the size-dependent energy gap of individual CdSe quantum dots by valence electron energy-loss spectroscopy*, Ultramicroscopy, vol. 107, iss. 2–3, 2007, s. 267–273, <https://doi.org/10.1016/j.ultramic.2006.08.002>.
- [14] Tauc J., Grigorovici R., Vancu A., *Optical properties and electronic structure of amorphous germanium*, Physica Status Solidi (B), vol. 15, iss. 2, 1966, s. 627–637, <https://doi.org/10.1002/pssb.19660150224>.

Paulina Choluta*

WENTYLACJA, KLIMATYZACJA, TRANSPLANTACJA – KSZTAŁTOWANIE MIKROKLIMATU W JEDNOSTKACH ONKOLOGICZNYCH

Historia aseptyki opowiada o ewolucji praktyk higieny medycznej, w tym także o momentach przełomowych, które doprowadziły do powstania aktualnych standardów zapobiegania zakażeniom w środowisku medycznym. Prerażające statystyki ilustrują skutki braku należytej higieny w placówkach onkologicznych. Ocena czystości pomieszczeń czystych wymaga monitorowania liczby cząsteczek i mikroorganizmów w powietrzu, a także ścisłej kontroli parametrów środowiskowych, takich jak wilgotność, temperatura, oświetlenie, różnica ciśnień oraz poziom elektryczności statycznej. Te parametry są rygorystycznie regulowane i nadzorowane, tak aby utrzymać je w granicach określonych przez odpowiednie normy i standardy dotyczące zachowania aseptyki w placówkach medycznych. Badanie stabilności przepływu powietrza w placówkach onkologicznych, w których wymagane jest utrzymanie najwyższej klasy czystości powietrza, obejmuje m.in. testowanie i optymalizację systemów wentylacyjnych i filtracyjnych w kontekście zapewnienia bezpieczeństwa pacjentów. Transplantacja odgrywa istotną rolę w onkologii, ponieważ umożliwia przeszczepienie narządów lub komórek, co może być częścią terapii nowotworowej, zwłaszcza w przypadku chorób hematologicznych.

VENTILATION, AIR CONDITIONING, TRANSPLANTATION – SHAPING THE MICROCLIMATE IN ONCOLOGY UNITS

The history of aseptic practices recounts the evolution of medical hygiene practices, including pivotal moments that led to the establishment of current standards for preventing infections in the medical environment. Alarming statistics illustrate the consequences of inadequate hygiene in oncology facilities. Evaluating the cleanliness of clean rooms requires monitoring the number of particles and microorganisms in the air, as well as strict control of environmental parameters such as humidity, temperature, lighting, pressure differentials, and static electricity levels. These parameters are rigorously regulated and monitored to maintain them within the limits specified by relevant norms and standards regarding the preservation of aseptic conditions in medical facilities. Examining the stability of airflow in oncology facilities, where maintaining the highest air cleanliness class is required, includes testing and optimizing ventilation and filtration systems to ensure patient safety. Transplantation plays a significant role in oncology as it enables the transplantation of organs or cells, which may be part of cancer therapy, especially in hematological diseases.

* AGH Akademia Górniczo-Hutnicza, Wydział Inżynierii Lądowej i Gospodarki Zasobami, Koło Naukowe „Kliwent”.

1. WSTĘP – KRÓTKA HISTORIA ASEPTYKI

Aseptyka to dziedzina nauki i praktyki medycznej oraz farmaceutycznej, która zajmuje się zapobieganiem zakażeniom mikroorganizmami, takimi jak bakterie, wirusy, grzyby czy pierwotniaki, przez utrzymanie odpowiednich parametrów środowiskowych [1].

Aseptyka odgrywa kluczową rolę w operacjach chirurgicznych, zabiegach medycznych, opiece nad pacjentami oraz przy produkcji i przechowywaniu leków. Jej celem jest minimalizacja ryzyka zakażeń krzyżowych oraz zapewnienie bezpieczeństwa pacjentów i personelu medycznego przez stosowanie środków dezynfekcyjnych, czystych technik pracy, a także odpowiednich procedur i wyposażenia.

W farmacji aseptyka jest istotna przy produkcji leków, szczególnie tych, które będą podawane wewnętrznie, wstrzykiwane lub aplikowane na skórę. Zapewnienie czystości podczas procesu produkcyjnego jest kluczowe dla uniknięcia zanieczyszczeń i zachowania skuteczności oraz bezpieczeństwa leków.

Osoby, które doznały złamania kończyny, zdają sobie sprawę z istotności specjalistycznego leczenia i długotrwałej rekonwalescencji, związanej z intensywnym bólem i ograniczeniem funkcji ruchowej. Około 150 lat temu złamane kończyny często wymagały interwencji amputacyjnej, co z kolei niosło za sobą poważne ryzyko śmiertelnych powikłań, zwłaszcza związanych z infekcjami spowodowanymi przez patogeny przenoszone drogą powietrzną.

Florence Nightingale (rys. 1) (ur. 12 maja 1820 roku we Florencji, zm. 13 sierpnia 1910 roku w Londynie) [1], uznawana za pionierkę pielęgniarstwa, zdawała sobie doskonale sprawę z kluczowego znaczenia czystości środowiska dla skuteczności leczenia. Uważała, że nawet najbardziej precyzyjny zabieg chirurgiczny może być nieskuteczny, jeśli nie zapewni się odpowiednich warunków sanitarnych.



Rys. 1. Fotografia przedstawiająca Florence Nightingale

Źródło: [2]

W ramach starań o utrzymanie czystości powietrza wewnątrz szpitali Nightingale sięgała po różne środki, włączając w to rozpylanie karbolu, który – z powodu nieprzyjemnego zapachu – miał zmusić personel medyczny do otwierania okien i zapewnienia właściwej wentylacji, szczególnie w okresach zimowych, gdy zamykano okna.

W tamtych latach problem braku wentylacji był utożsamiany z nieprzyjemnym zapachem. Pojawiał się w okresie zimowym, kiedy zamykano okna, które umożliwiały napływ zimnego powietrza zewnętrznego, celem ograniczenia strat ciepła. W efekcie brakowało wymiany powietrza w pomieszczeniu. Nightingale miała nadzieję, że rozpylanie karbolu w sali operacyjnej zmusi chirurgów do otwierania okien z powodu towarzyszącego rozpylaniu nieprzyjemnego zapachu. Sama proponowała następującą metodę wentylowania pomieszczeń zimą: wlot powietrza do pomieszczenia przez okno uchylone tuż przy suficie, zaś wylot – na poziomie podłogi, przez ciąg kominkowy dostarczający powietrza potrzebnego do spalania [1]. Warto zaznaczyć, że w Anglii i Szkocji w tamtych czasach najpopularniejszym sposobem ogrzewania pomieszczeń było właśnie korzystanie z kominków. Propozycja Florence Nightingale, opierająca się na wykorzystaniu kominkowego ciągu powietrza do wentylacji, może być uznana za pionierskie podejście do organizacji wymiany powietrza w salach operacyjnych.

2. STATYSTYKI WHO

Dane statystyczne WHO (World Health Organization) wskazują na znaczący problem związany z czystością powietrza w szpitalach, zwłaszcza w salach operacyjnych, co stanowi istotne zagrożenie dla pacjentów. Szacuje się, że na całym świecie co najmniej 10% operowanych pacjentów doświadcza zakażeń, z których 3–5% prowadzi bezpośrednio do zgonu, a kolejne 8% stanowi przyczynę zgonów wtórnych. W Polsce rocznie liczba zgonów z tego powodu wynosi prawdopodobnie między 74 tys. a 88 tys. [3].

W krajach takich jak Francja od 6% do 10% pacjentów doznaje infekcji podczas pobytu w szpitalu, co stanowi między 60 tys. a 100 tys. przypadków rocznie. Te dane alarmująco przypominają o skali problemu, porównywalnej z liczbą ofiar śmiertelnych wypadków samochodowych. W raporcie brytyjskiego rządu z 2000 roku podkreślono, że rocznie w Szkocji więcej osób umiera z powodu infekcji pooperacyjnych niż w wypadkach samochodowych. W USA dane z tego samego roku pokazują, że 1,8 mln Amerykanów doświadcza infekcji w wyniku zabiegów operacyjnych, z czego 5% kończy się zgonem (co daje około 88 tys. osób) [4].

Oprócz licznych regulacji dotyczących systemów zapobiegających przenoszeniu zakażeń obecnie coraz większe znaczenie przypisuje się urządzeniom, które mają bezpośredni wpływ na mikroklimat w pomieszczeniach szpitalnych, zwłaszcza systemom wentylacyjnym i klimatyzacyjnym. Klimatyzacja sal operacyjnych oraz całościowych bloków operacyjnych jest uważana za niezbędną infrastrukturę technologiczną.

3. CLEANROOM – MIKROKLIMAT POMIESZCZEŃ CZYSTYCH

Cleanroom, znany także jako pomieszczenie czyste (rys. 2), to specjalnie zaprojektowane i utrzymane miejsce, gdzie kontrola liczby cząsteczek oraz mikroorganizmów w powietrzu, a także parametry środowiskowe, takie jak wilgotność powietrza, temperatura, oświetlenie,

różnica ciśnień oraz poziom elektryczności statycznej, są surowo regulowane i monitorowane w celu zapewnienia, że pozostają one w granicach dopuszczalnych określonych przez normy takie jak ISO 14644 [5, 6].



Rys. 2. Pracownicy na stanowisku do sterylizowania odzieży medycznej (firma Bardush)

Źródło: [7]

Pomieszczenia czyste pełnią ważną rolę w ochronie produktów znajdujących się w ich wnętrzu przed zanieczyszczeniami pochodzącymi z powietrza, które mogą mieć postać cząstek stałych, mikroorganizmów czy też innych substancji, co wpływa na jakość produktów. Ważną cechą cleanroomów jest także ich zdolność do utrzymania stabilnego mikroklimatu, który jest istotny dla zachowania czystości i kontrolowanych warunków produkcyjnych. Przez precyzyjną kontrolę parametrów takich jak wilgotność, temperatura, oświetlenie, różnica ciśnień oraz poziom elektryczności statycznej cleanroomy zapewniają optymalne warunki dla procesów produkcyjnych oraz zachowanie czystości środowiska [6].

Stabilny mikroklimat w cleanroomach ma istotne znaczenie dla zapobiegania zanieczyszczeniom i utrzymania wysokiej jakości produkowanych artykułów. Dodatkowo kontrolowane warunki mikroklimatyczne sprzyjają również komfortowi pracy personelu oraz efektywności procesów produkcyjnych. Dlatego też, oprócz kontroli liczby cząstek i mikroorganizmów w powietrzu, utrzymanie odpowiedniego mikroklimatu jest bardzo ważne dla zapewnienia skuteczności cleanroomów oraz osiągnięcia zamierzonych celów produkcyjnych. W cleanroomach wszelkie działania i procesy są realizowane w kontrolowanych, wolnych od zanieczyszczeń warunkach, co jest kluczowe dla branż, gdzie czystość i jakość produktu są niezwykle istotne, takich jak przemysł farmaceutyczny, elektroniczny czy produkcja żywności [8].

Dzięki rygorystycznej kontroli środowiska w cleanroomach możliwe jest zapewnienie wysokiej jakości produktów oraz minimalizacja ryzyka zanieczyszczeń, co ma duże znaczenie dla bezpieczeństwa konsumentów oraz spełnienia wymagań regulacyjnych i standardów branżowych. Pomieszczenia czyste w jednostkach onkologicznych są niezbędne dla utrzymania sterylnego środowiska w celu minimalizacji ryzyka infekcji, zwłaszcza u pacjentów z osłabionym układem odpornościowym poddawanych leczeniu bądź transplantacji. Tego rodzaju środowiska zapewniają ścisłą kontrolę cząstek unoszących się w powietrzu i mikroorganizmów, aby chronić zdrowie i dobrostan pacjentów.

4. TRANSPLANTACJA I WARUNKI ŚRODOWISKOWE

Transplantacja narządów to złożony proces medyczny, który wymaga precyzyjnie kontrolowanych warunków środowiskowych w celu zapewnienia sukcesu zabiegu oraz minimalizacji ryzyka infekcji i odrzutu przeszczepu (rys. 3). Istotną rolę w tym procesie odgrywają czyste powietrze oraz efektywna wentylacja i klimatyzacja, które mają istotny wpływ zarówno na stan pacjenta, jak i przeszczepiany narząd.

Czyste powietrze jest istotnym czynnikiem w zapobieganiu zakażeniom podczas procesu transplantacji. Wysoka jakość powietrza wolnego od zanieczyszczeń, pyłów oraz drobnoustrojów jest niezbędna dla zapewnienia optymalnych warunków sanitarnych w salach operacyjnych i oddziałach transplantacyjnych. W związku z tym stosuje się zaawansowane filtry, takie jak filtry HEPA (*high efficiency particulate air*) lub ULPA (*ultra-low penetration air*), które skutecznie eliminują drobnoustroje i alergenów z powietrza. W tabelach 1 i 2 zamieszczono klasyfikację filtrów zaproponowaną przez Eurovent.

Tabela 1. Porównanie klasyfikacji filtrów przeciwpyłowych dla wentylacji ogólnej

Klasa filtra (PN-EN 779:2012E)	Skuteczność filtracji dla klas filtrów od M5 do F9 na podstawie testów opisanych w PN-EN ISO 16890-1:2017E [%]		
	test dla cząstek		
	ePM ₁ (0,3–1,0 μm)	ePM _{2,5} (0,3–2,5 μm)	ePM ₁₀ (0,3–10 μm)
M5	5–35	10–45	40–70
M6	10–40	20–50	60–80
F7	40–65	65–75	80–90
F8	65–90	75–95	90–100
F9	80–90	85–95	90–100

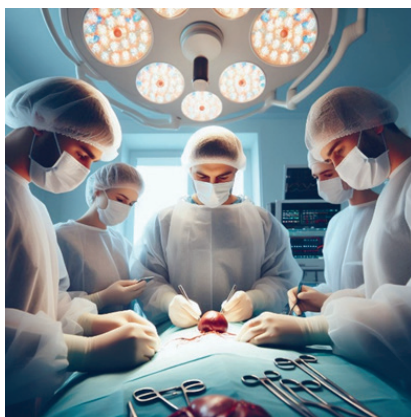
Źródło: [7]

Skuteczna wentylacja i klimatyzacja są nieodłącznym elementem zapewnienia bezpieczeństwa i komfortu podczas zabiegów transplantacji. Odpowiednia cyrkulacja powietrza zapewnia równomierne rozprowadzenie czystego powietrza w całym pomieszczeniu, minimalizując ryzyko przeniesienia drobnoustrojów oraz utrzymując optymalną temperaturę i wilgotność, co jest kluczowe dla kondycji pacjenta oraz zachowania prawidłowej funkcji przeszczepionego narządu.

Tabela 2. Klasyfikacja skutecznych i wysoko skutecznych filtrów powietrza

Grupa filtrów	Klasa filtra				Wartość całkowita [%]		Wartość miejscowa [%]	
	PN-EN 1822-1 2009		ISO 29463-1		skuteczność dla cząstek MPPS	penetracja dla cząstek MPPS	skuteczność dla cząstek MPPS	penetracja dla cząstek MPPS
	klasa	test	klasa	test	ISO 29463-1			
EPA	E10	–	–	–	≥ 85	≤ 15	–	–
	E11	–	ISO 15E	MPPS	≥ 95	≤ 5	–	–
	–	–	ISO 20E	MPPS	≥ 99	≤ 1	–	–
	E12	–	ISO 25E	MPPS	$\geq 95,5$	$\leq 0,5$	–	–
	–	–	ISO 30E	MPPS	$\geq 95,9$	$\leq 0,1$	–	–
HEPA	H13	MPPS	ISO 35E	MPPS	$\geq 99,95$	$\leq 0,05$	$\geq 99,5$	$\leq 0,25$
	–	MPPS	ISO 40E	MPPS	$\geq 99,99$	$\leq 0,01$	$\geq 99,95$	$\leq 0,05$
	H14	MPPS	ISO 45E	MPPS	$\geq 99,995$	$\leq 0,005$	$\geq 99,975$	$\leq 0,025$
	–	MPPS	ISO 50E	MPPS	$\geq 99,999$	$\leq 0,001$	$\geq 99,995$	$\leq 0,005$
ULPA	U15	MPPS	ISO 55E	MPPS	$\geq 99,9995$	$\leq 0,0005$	$\geq 99,9975$	$\leq 0,0025$
	–	MPPS	ISO 60E	MPPS	$\geq 99,9999$	$\leq 0,0001$	$\geq 99,9995$	$\leq 0,0005$
	U16	MPPS	ISO 65E	MPPS	$\geq 99,99995$	$\leq 0,00005$	$\geq 99,99975$	$\leq 0,00025$
	–	MPPS	ISO 70E	MPPS	$\geq 99,99999$	$\leq 0,00001$	$\geq 99,9999$	$\leq 0,0001$
	U17	MPPS	ISO 75E	MPPS	$\geq 99,999995$	$\leq 0,000005$	$\geq 99,9999$	$\leq 0,0001$

Źródło: [7]

**Rys. 3.** Zabieg przeszczepu narządu

Źródło: zdjęcie wygenerowane przez sztuczną inteligencję (Microsoft Bing)

Pomieszczenia przeznaczone do przeprowadzania zabiegów transplantacji muszą być ściśle kontrolowane pod względem czystości powietrza, wilgotności i temperatury. Systemy monitorujące parametry środowiskowe pozwalają na ciągłą ocenę warunków i natychmiastowe reagowanie w przypadku ich odchylenia od normy. Dzięki temu minimalizowane jest ryzyko zakażeń i zapewniana jest optymalna jakość opieki dla pacjentów poddających się transplantacji.

Niezwykle istotne są również innowacyjne rozwiązania technologiczne, które wspierają proces transplantacji przez udoskonalenie systemów wentylacji i klimatyzacji. Przykładowo rozwój inteligentnych systemów sterowania pozwala na automatyczną regulację parametrów środowiskowych w czasie rzeczywistym, co zwiększa efektywność i bezpieczeństwo przeprowadzanych zabiegów.

W procesie transplantacji narządów istotne są czynniki środowiskowe: czyste powietrze, wentylacja i klimatyzacja. Środowisko operacyjne musi być starannie kontrolowane, aby zapewnić optymalne warunki zarówno dla pacjenta, jak i przeszczepianego narządu. Eliminacja zanieczyszczeń i drobnoustrojów z powietrza przy użyciu zaawansowanych filtrów jest kluczowa dla zapobiegania infekcjom i minimalizacji ryzyka odrzutu przeszczepu. Skuteczna wentylacja i klimatyzacja pomagają utrzymać stabilną temperaturę i wilgotność, co jest istotne dla powodzenia zabiegu. Wdrażanie nowoczesnych rozwiązań technologicznych, które umożliwiają monitorowanie i kontrolę warunków środowiskowych w czasie rzeczywistym, przyczynia się do poprawy bezpieczeństwa i efektywności procesu transplantacji.

5. PERSPEKTYWY ROZWOJU KONTROLI MIKROKLIMATU W ONKOLOGII

Współczesne badania nad mikroklimatem w kontekście leczenia onkologicznego wyznaczają nowe kierunki rozwoju w zakresie zapewnienia optymalnych warunków środowiskowych pacjentom poddawanych terapii przeciwnowotworowej. Dążenie do poprawy mikroklimatu w onkologii obejmuje zarówno aspekty fizyczne, takie jak kontrola temperatury i wilgotności, jak i eliminację potencjalnych czynników zakaźnych z otoczenia pacjentów.

Technologie oczyszczania powietrza

Wdrażane są zaawansowane systemy wentylacji i klimatyzacji, wyposażone w filtry wysokiej jakości, które skutecznie eliminują cząstki zanieczyszczeń z powietrza w salach onkologicznych. Wykorzystanie nowoczesnych filtrów HEPA zapewnia redukcję ilości pyłów, wirusów i bakterii, co jest kluczowe dla zapobiegania infekcjom u pacjentów z osłabionym układem odpornościowym.

Kontrola temperatury i wilgotności

Niezmiennie istotnym aspektem jest utrzymanie stabilnych warunków temperaturowych i wilgotnościowych. Badania sugerują, że może to wpływać na samopoczucie pacjentów oraz skuteczność terapii. W związku z tym rozwijane są systemy monitorowania i automatycznej regulacji temperatury oraz wilgotności, które pozwalają na precyzyjne dostosowanie warunków do indywidualnych potrzeb pacjentów.

Innowacyjne materiały budowlane

W budownictwie szpitalnym coraz częściej stosuje się innowacyjne materiały o właściwościach antybakteryjnych i antyalergicznym, które minimalizują ryzyko zakażeń krzyżowych oraz reakcji alergicznych u pacjentów. Powierzchnie łatwe do dezynfekcji oraz ochrona przed rozwojem pleśni i grzybów stanowią istotny czynnik poprawy mikroklimatu w onkologii.

Integracja z terapią farmakologiczną

Perspektywy rozwoju mikroklimatu w onkologii obejmują również integrację innowacyjnych rozwiązań z terapią farmakologiczną. Badania na przykład nad terapią fotodynamiczną wykorzystującą światło w celu niszczenia komórek nowotworowych wskazują na ścisły związek między optymalnymi warunkami środowiskowymi a skutecznością terapii [9].

6. PODSUMOWANIE

Podsumowując przedstawione rozważania, można stwierdzić, że czyste powietrze, skuteczna wentylacja i klimatyzacja odgrywają kluczową rolę w procesie transplantacji, wpływając zarówno na bezpieczeństwo pacjenta, jak i sukces zabiegu. Wdrażanie zaawansowanych technologii oraz ścisła kontrola warunków środowiskowych w pomieszczeniach transplantacyjnych są niezbędne dla zapewnienia optymalnych warunków i maksymalnej skuteczności tego skomplikowanego procesu medycznego.

Zagadnienie pomieszczeń czystych jest bardzo złożone. Nie ma jednej konkretnej reguły ani tym bardziej schematu prac. Każdy przeszczep niesie bardzo wysokie ryzyko powikłań, dlatego trzeba zapewnić jak najlepsze warunki, w których planowana operacja ma się odbywać. W Polsce powstaje nowe Dolnośląskie Centrum Onkologii, Pulmonologii i Hematologii we Wrocławiu, gdzie zaprojektowano około 15 sal typu cleanroom. Należy pamiętać, że każdy cleanroom może być salą operacyjną, lecz nie każda sala operacyjna jest cleanroomem.

Podziękowania

Artykuł powstał na podstawie ogłoszonego podczas 64. Barbórkowej Konferencji Studenckich Kół Naukowych AGH referatu, który zajął pierwsze miejsce w sekcji X – Wentylacja, Klimatyzacja, Ogrzewnictwo. Serdeczne podziękowania kierujemy do firmy inżynierskiej I.K.A-Technik Inżynieria Przemysłu oraz firmy farmaceutycznej Teva.

LITERATURA

- [1] Nightingale F., *Notes on Nursing. What It Is and What It Is Not*, Churchill Livingstone, Edinburgh 1980.
- [2] Usidus M., *Panteon bohaterów medycyny: Florence Nightingale*, <https://oczymbokarze.pl/styl-zycia/swiat-wokol-nas/4099-panteon-bohaterow-medycyny-florence-nightingale> [dostęp: 19.03.2024].

- [3] Kulik A., *Zaraza*, Wprost, nr 37, 1996, s. 65–66.
- [4] Hughes S.P.F., Anderson F.M., *Infection in the operating room*, The Journal of Bone & Joint Surgery (Br), vol. 81-B, no. 5, 1999, s. 754–755, <https://doi.org/10.1302/0301-620X.81B5.0810754>.
- [5] PN-EN ISO 14644-1:2016-03, *Pomieszczenia czyste i związane z nimi środowiska kontrolowane – Część 1: Klasyfikacja czystości powietrza na podstawie stężenia cząstek*.
- [6] Chołota P., *Cleanroom – Istota wentylacji i klimatyzacji w pomieszczeniach czystych i sterylnych*, [w:] Bogacz P. (red.), *Artykuły Laureatów 63. Barbórkowej Konferencji Studenckich Kół Naukowych AGH*, Wydawnictwa AGH, Kraków 2023, s. 7–19.
- [7] Charkowska A., *Nowa klasyfikacja wysokoskutecznych filtrów powietrza*, <https://www.rynekinstalacyjny.pl/artukul/centrale-wentylacyjno-klimatyzacyjne/37488,nowa-klasyfikacja-wysokoskutecznych-filtrow-powietrza> [dostęp: 11.02.2024].
- [8] Jackiewicz B., *Dokumentacja sanitarna według zasad Dobrej Praktyki Produkcyjnej (GMP) i Dobrej Praktyki Higienicznej (GHP). Instrukcje, zapisy. Zakłady żywienia zbiorowego*, Ośrodek Doradztwa i Doskonalenia Kadr, Gdańsk.
- [9] Krzakowski M., Potemski P., Warzocha K., Wysocki P. (red.), *Onkologia kliniczna. Tom 1*, Via Medica, Gdańsk 2014.

Wiktor Dębicki*

INNOWACYJNE TECHNOLOGIE I MATERIAŁY WYKORZYSTYWANE PRZY PRODUKCJI CHWYTÓW WSPINACZKOWYCH

Chwyty wspinaczkowe są podstawowym elementem wyposażenia każdej ściany wspinaczkowej – komercyjnej, domowej czy specjalistycznej. Wybór odpowiednich materiałów oraz technologii produkcji jest kluczowy dla spełnienia przez nie wszystkich norm. Chwyty wspinaczkowe, zgodnie z obowiązującymi przepisami prawa, muszą mieć odpowiedni atest lub certyfikat, który został potwierdzony przez niezależną akredytowaną jednostkę badawczą. W związku z tym dąży się do automatyzacji procesów produkcyjnych, zmniejszenia ilości odpadów oraz wykorzystywania materiałów z uwzględnieniem aspektu ekologicznego. W pracy przedstawiono etapy procesów produkcji. Po dokonaniu analizy technologiczno-technicznej przedstawiono największe korzyści jakościowe zaproponowanych rozwiązań oraz wskazano kierunki dalszych działań.

INNOVATIVE TECHNOLOGIES AND MATERIALS USED IN THE PRODUCTION OF CLIMBING HOLDS

Climbing holds are a basic element of the equipment of every climbing wall – commercial, home or specialized. The selection of appropriate materials and production technology is crucial to ensure that they meet all standards. Climbing holds, in accordance with applicable law, must have an appropriate approval or certificate, which has been confirmed by an independent accredited research unit. Therefore, efforts are made to automate the production processes of climbing holds, reduce the amount of waste and use materials taking into account the ecological aspect. The work presents the stages of production processes. After the technological and technical analysis, the greatest qualitative benefits of the proposed solutions were presented and directions for further actions were indicated.

* AGH Akademia Górniczo-Hutnicza, Wydział Zarządzania, Koło Naukowe „Menadżer Produkcji”.

1. WPROWADZENIE

Wspinaczka jest sportem pozwalającym użytkownikowi wyrobić bardzo dobrą kondycję fizyczną oraz sprawność motoryczną. Chwyty są podstawowym elementem wyposażenia każdej ścianki wspinaczkowej. Umożliwiają one regularne trenowanie, zwłaszcza w dni, kiedy pogoda nie pozwala na aktywny trening na otwartym terenie. Zadaniem chwytów jest imitacja rzeczywistych warunków górskich. Ich różnorodność i kształt (rys. 1) mają istotny wpływ na budowanie z nich dróg wspinaczkowych o różnych poziomach trudności. Chwyty wspinaczkowe muszą mieć odpowiednie atesty jakościowe, a ich jakość uzależniona jest od rodzaju użytych materiałów i zastosowanej technologii produkcji.



Rys. 1. Przykładowe kształty chwytów wspinaczkowych

Główną motywacją do napisania artykułu jest przedstawienie najbardziej przełomowych rozwiązań technologicznych z użyciem druku 3D, a także porównanie materiałów wykorzystywanych w produkcji chwytów wspinaczkowych na podstawie analizy badań wytrzymałościowych. Przeprowadzona analiza dostarcza niezbędnej wiedzy popularnonaukowej na temat technologii obecnie stosowanej do wytwarzania chwytów wspinaczkowych i przedstawia innowacyjne podejście do ich produkcji masowej w przyszłości.

2. RODZAJE CHWYTÓW WSPINACZKOWYCH

Chwyty są podstawowym elementem wyposażenia ścian wspinaczkowych. Od ich typu i kształtu uzależniony jest poziom trudności dróg wspinaczkowych [1]. Przy projektowaniu tzw. prostych dróg dla wspinaczy początkujących wykorzystuje się chwyty zagięte, tj. klamry, które łatwo chwycić dłonią. Na drogach przeznaczonych dla osób wspinających się na poziomie średnio zaawansowanym oraz zaawansowanym stosuje się chwyty wspinaczkowe o złożonym kształcie, które wymagają od wspinacza dużo większych umiejętności sportowych, a także angażują zarówno stopy, jak i dłonie.

Do tego typu uchwytów należą [2]:

- krawądkki (*crimps*), małe chwytty o cienkich krawędziach (rys. 2), o głębokości od jednego opuszka palca do mniej niż połowy opuszka palca, wymagające dużej siły chwytu;



Rys. 2. Przykładowe krawądkki

Źródło: [3]

- oblaki (*slopers*), zaokrąglone chwytty (rys. 3) wymagające pracy całej dłoni;



Rys. 3. Przykładowe oblaki

Źródło: [4]

- ściski (*pinches*), chwytty o skomplikowanych kształtach uchwytu i dowolnych rozmiarach (rys. 4) umożliwiające wspinaczowi umieszczenie czterech palców dłoni po jednej stronie chwytu i owinięcie kciuka wokół drugiej strony;



Rys. 4. Przykładowe ściski

Źródło: [5]

- klamy (*jugs*), chwytty wykorzystywane w drogach dla osób początkujących, a także jako miejsce na tak zwany odpoczynek (rys. 5) na trudniejszej trasie wspinaczkowej, umożliwiające stabilny i bezpieczny chwyt;



Rys. 5. Przykładowe klamy

Źródło: [6]

- dwójki/trójki (*pockets*), mniejsze chwytły umożliwiające chwyt tylko dwoma lub trzema palcami (rys. 6), wymagające mocnych palców u rąk, mogące równie dobrze utrzymać stopy (dopasowują się do czubka butów wspinaczkowych);



Rys. 6. Przykładowe dwójki/trójki

Źródło: [7]

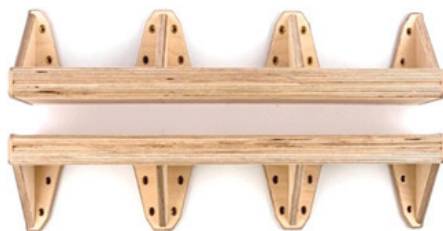
- paczki/struktury (*volume*), duże bryły przypominające blok konstrukcyjny na ścianie (rys. 7), umożliwiające utrzymanie krawędzi/powierzchni danej struktury w odpowiednich płaszczyznach;



Rys. 7. Przykładowe struktury

Źródło: [8]

- rysy (*crack*), elementy o różnej szerokości (rys. 8), od wąskich szczelin na palce aż po szerokie i trudne do wspinaczki kominy, wymagające klinowania się palców [9] (w przypadku wąskich rys) lub całych dłoni i pięści (w przypadku szerszych rys) przy użyciu odpowiednich rękawic.

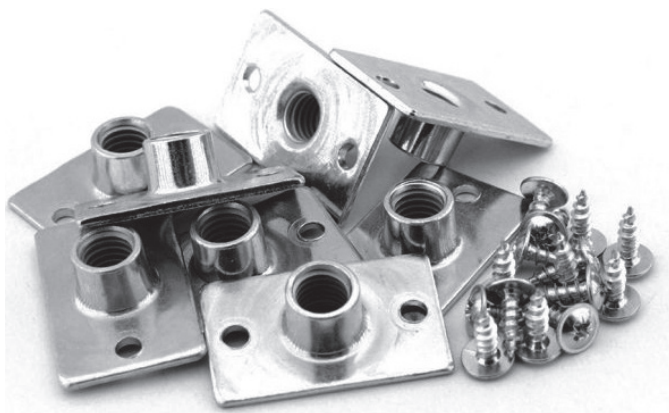


Rys. 8. Rysa do użytku na ściankach wspinaczkowych

Źródło: [10]

3. MONTAŻ CHWYTÓW NA ŚCIANKACH

Ściany wspinaczkowe zbudowane są z paneli (ze sklejk o grubości 18–21 mm) [11]. Na każdy metr kwadratowy panelu przypada 20–40 sztuk specjalnie przygotowanych nakręcanych gniazd do montażu chwytów (rys. 9).



Rys. 9. Gniazda do montażu chwytów wspinaczkowych

Źródło: [12]

Chwyty wspinaczkowe przykręca się do ściany za pomocą specjalistycznych śrub o określonych wymaganiach konstrukcyjnych (rys. 10 i 11). Duże i średnie chwyty mają jedno główne mocowanie na dużą śrubę i co najmniej jeden otwór typu *spax* w celu zabezpieczenia montowanego chwytu przed poluzowaniem się i obracaniem.



Rys. 10. Duża śruba z pełnym gwintem oraz końcówka imbus 8 mm do jej montażu

Źródło: [13, 14]



Rys. 11. Spaxy montażowe oraz końcówka TX20 do ich montażu

Źródło: [15, 16]

4. MATERIAŁY STOSOWANE W PRODUKCJI CHWYTÓW

W celu wykonania chwytów wspinaczkowych o jak najwyższej jakości firmy przodujące w ich produkcji od lat prowadzą testy i badania nad wykorzystaniem innowacyjnych materiałów. Pierwotnie chwyt był odlewany z żywicy, przez co charakteryzowały się dużą masą i niestabilnym chwytem. Obecnie wykonuje się je z takich materiałów, jak (rys. 12) [17]:

- poliuretan,
- silikony addycyjne,
- silikony kondensacyjne,
- żywice poliestrowe,
- żywice poliuretanowe,
- włókno szklane,
- drewno.



Rys. 12. Miks chwytów wykonanych z poliuretanu, żywicy oraz drewna

Każdy materiał ze względu na swoje właściwości jest wykorzystywany do wytwarzania innego typu chwytów. Struktury wspinaczkowe konstruuje się z drewna, mniejsze i średnie chwytory najczęściej odlewane są z żywicy, a wiodącym materiałem, który pozwala na produkcję zarówno drobnych krawadek, jak i wielkich struktur, jest poliuretan. Wykorzystanie go do produkcji chwytów zrewolucjonizowało rynek ścianek wspinaczkowych. Dzięki temu chwytory są lekkie i charakteryzują się dużą wytrzymałością oraz sztywnością.

Na rynku wspinaczkowym dostępne są chwytory o różnych kształtach, teksturach i kolorach. Każdy z nich łączy jedna kluczowa właściwość, tj. współczynnik tarcia. Dobry chwyt powinien mieć odpowiednią geometrię i teksturę. Innym kluczowym parametrem jest przyczepność, którą uzyskuje się dzięki wykorzystywaniu powłok porowatych. Ponadto chwytory powinny charakteryzować się odpowiednią wytrzymałością, twardością, sprężystością i udarnością, a także dobrze absorbować energię i być odporne na ścieranie, uderzenia i wilgoć [18]. Wszystkie te właściwości decydują o bezpieczeństwie.

Poliuretan jest materiałem obecnie najczęściej wykorzystywanym w procesie produkcyjnym chwytów wspinaczkowych (rys. 13). Do jego zalet należą właściwości wymienione poniżej [19]:

- Uniwersalność. Bardzo łatwo go formować, co pozwala na tworzenie chwytów w każdym możliwym kształcie. Jedynym ograniczeniem jest tutaj wyobraźnia shapera (osoby projektującej chwytory). Poliuretan jest dużo łatwiejszy w obróbce niż drewno czy żywica, co umożliwia produkcję spersonalizowanych chwytów.
- Przyczepność. Poliuretan charakteryzuje się znakomitą przyczepnością, co jest kluczową cechą każdego chwytu wspinaczkowego zarówno dla osób początkujących, jak i zaawansowanych.
- Wytrzymałość. Chwytory z poliuretanu mają bardzo dobrą wytrzymałość na zużycie i na rozrywanie, co czyni je bardzo trwałymi. To cecha kluczowa dla właścicieli komercyjnych ścianek wspinaczkowych, ze względu na liczbę klientów i stopień eksploatacji chwytów.
- Niska masa. Chwytory wykonane z poliuretanu są dużo lżejsze niż ich odpowiedniki z żywicy, dzięki czemu możliwe jest wykonywanie tras o różnych poziomach trudności.
- Szybkość schnięcia. Proces zastygania/schnięcia poliuretanu jest o wiele krótszy niż innych materiałów. Ta właściwość umożliwia produkowanie większej liczby chwytów w krótszym czasie.



Rys. 13. Płyty poliuretanowe PUR

Źródło: [20]

5. SCHEMAT PRODUKCJI CHWYTÓW

Produkcję chwytów wspinaczkowych można podzielić na kilka etapów [21]:

1. **Pomysł.** Osoby odpowiedzialne za projektowanie nazywane są shaperami, to oni rozpoczynają proces przygotowania nowych chwytów. Spod ich rąk wychodzą najbardziej zaawansowane kształty.
2. **Prototypy.** Po ustaleniu kształtu następuje wykonanie prototypu chwytu. Używa się do tego pianek syntetycznych, drewna lub gipsu. Po wyrzeźbieniu konkretnego kształtu z odpowiednim tarciem dodajemy otwory montażowe i otrzymujemy gotowy model.
3. **Forma do odlewania.** Na podstawie gotowego modelu tworzy się formę odlewu, która posłuży następnie do produkcji seryjnej. Powierzchnia wewnątrz formy odlewniczej będzie odpowiadać powierzchni gotowego wyrobu.
4. **Odlewanie chwytu.** Gotowe formy zalewa się wybranym uprzednio materiałem (w tym celu najczęściej wykorzystywane są żywice epoksydowe lub poliestrowe), który będzie trwały i odporny na warunki atmosferyczne. Następnie chwyt utwardza się w temperaturze pokojowej, po czym wykonuje się ich obróbkę wykańczającą.
5. **Obróbka.** Odpowiednio szlifujemy i/lub przycinamy powierzchnie, tak aby uzyskać oczekiwany kształt i fakturę. Do obróbki najczęściej wykorzystuje się papier ścierny, szlifierki kątowe czy też maszyny wycinające. Dodatkowo chwyt mogą być odpowiednio polakierowane, aby nadać im określony kolor czy też dodatkowe tarcie.
6. **Testy.** Uzyskany wyrób finalny poddaje się seriom testów. Wszystkie chwyt powinny być wykonywane zgodnie z europejską normą PN-EN 12572 [22]. Dodatkowo producenci sprawdzają, czy otwory montażowe chwytów są odpowiednio wykonane i umożliwiają prawidłowy montaż na ścianie. Gotowe serie chwytów następnie są testowane w praktyce przez routesetterów oraz wspinaczy.

Działanie według powyższego schematu pozwala na wyprodukowanie chwytu wspinaczkowego zgodnego z projektem oraz spełniającego wszystkie normy techniczne.

6. PROJEKTOWANIE CHWYTÓW

Projektowanie chwytów to dziedzina, w której świetnie odnajdują się wspinacze z dużym doświadczeniem. Wykorzystując ich wiedzę, projektuje się różne typy chwytów, które mają swoim kształtem i teksturą odzwierciedlić rzeczywiste warunki górskie. Na rysunku 14 przedstawiono przykładową pracownię rzeźbienia chwytów.

Projekt chwytu rozpoczyna się od przygotowania modelu, do którego produkcji wykorzystuje się różne rodzaje materiałów [23]. Najczęściej stosowane są bloki pianki syntetycznej, bloki drewna oraz gips i silikon (rys. 15). Prototypy wykonuje się często wielokrotnie aż do uzyskania pożądanego kształtu, jakości i tarcia (tab. 1).

Najczęściej wykorzystuje się piankę z poliuretanu w postaci szytywnej. Do dyspozycji są dwa jej typy [24] różniące się gęstością, która ma istotny wpływ na jakość i bezpieczeństwo chwytów. Podczas obróbki wykańczającej duże znaczenie ma łatwość formowania pianek typu PUR, dzięki której można w szybki i prosty sposób uzyskać pożądaną formę (rys. 16).



Rys. 14. Pracownia rzeźbienia chwytów

Źródło: [24]



Rys. 15. Porównanie sposobów rzeźbienia prototypów – maszynowo oraz ręcznie

Źródło: [24, 25]

Tabela 1. Specyfikacja techniczna pianek z poliuretanu [PUR]

Pianka zamkniętokomórkowa	Pianka otwartokomórkowa
wyższy poziom gęstości	niższy poziom gęstości
bardziej przyjemna, delikatniejsza dla skóry powierzchnia	bardziej szorstka, mniej delikatna dla skóry powierzchnia



Rys. 16. Gotowy wyrzeźbiony prototyp chwytu

Źródło: [24]

7. PRODUKCJA MASOWA

Produkcja każdego typu chwytów pochłania bardzo dużo energii, środków i czasu. Każdy rodzaj struktury oraz chwytu wymaga swojego własnego, zautomatyzowanego procesu produkcyjnego.

Struktury drewniane

Proces produkcji struktur drewnianych (rys. 17–19) wymaga drewna, a dokładniej mówiąc – sklejki drewnianej, która jest odpowiednio przycinana oraz segmentowana za pomocą obrabiarek oraz frezarek CNC. Następnie gotowe panele są nawiercane, tak aby można było nakręcić w nich gniazda do montażu chwytów. Tak przygotowane panele trafiają do kolejnego etapu, w którym są ze sobą klejone w jedną zwartą strukturę o różnej wielkości, mogącą przybierać kształt piramidy, stożka czy graniastosłupa.

Po operacji zespolenia chwytów przechodzą do kolejnego etapu procesu produkcji, tj. lakierowania. Malowanie i lakierowanie ma nadać im odpowiednią strukturę, kolor oraz tarcie. Na tym etapie procesu produkcji można wytworzyć chwytów zarówno o szorstkiej strukturze, jak i całkowicie śliskiej powierzchni.

Na końcowym etapie produkcji w uprzednio przygotowane i nawiercone otwory wkręca się odpowiednie gniazda do montażu chwytów. Po uzupełnieniu wszystkich gniazd otrzymujemy gotowy produkt. Przykład ukończonego chwytu w wybranej strukturze przedstawiono na rysunku 20.



Rys. 17. Pracownia obróbki drewna

Źródło: [26]



Rys. 18. Magazyn drewnianych struktur

Źródło: [26]



Rys. 19. Pracownia malarska struktur drewnianych

Źródło: [26]



Rys. 20. Gotowe przykładowe struktury wspinaczkowe

Źródło: [26]

Chwyty wspinaczkowe

Małe oraz średnie chwyt wspinaczkowe masowo produkuje się zgodnie z schematem opisanym w rozdziale 5. W pierwszej kolejności są one projektowane, następnie na bazie modelu przygotowuje się formy odlewnicze, które na ostatnim etapie służą do produkcji masowej. W zakładach wytwarzających chwyt wspinaczkowe wykorzystywane są formy na kompletne zestawy chwytów (tzw. sety). Dla każdego zestawu chwytów z określonego gatunku stosuje się jedną dużą formę zbiorową (rys. 21). Jest to bardzo praktyczne, ponieważ chwyt sprzedawane są właśnie w tak przygotowanych zestawach.



Rys. 21. Forma odlewnicza zalana żywicą, z której uzyskamy cały zestaw chwytów

Źródło: [26]

Odlewanie chwytów odbywa się w temperaturze ok. 30°C. Formy silikonowe są często podgrzewane do temperatury 50–70°C, a chwyt w procesie końcowym są utwardzane przez 6–10 godzin w temperaturze ok. 80°C. Po takim czasie chwyt gotowe są do dalszej obróbki, którą przedstawiono schematycznie na rysunkach 22 i 23.



Rys. 22. Wyjmowanie utwardzonych chwytów z form silikonowych

Źródło: [27]



Rys. 23. Szlifowanie krawędzi chwytu

Źródło: [27]

Ostatnim krokiem przed oddaniem chwytów do testów jest ich obróbka końcowa. Na tym etapie szlifowane są wszystkie niepożądane nierówności, przycina się powierzchnię chwytu na równo. Po tej operacji chwyt ma mieć strukturę zgodną z normami i atestami (rys. 24).



Rys. 24. Polakierowane chwyty rozmiaru L i większe

Źródło: [26]

Odpowiednio obrobione i polakierowane chwyty trafiają w dalszej kolejności do magazynu firmy, a następnie do sprzedaży komercyjnej. Zestawy chwytów mogą być sprzedawane w opcji klasycznej, jednak dużo firm oferuje alternatywną wersję chwytów, zwaną *dual-tex* (podwójna struktura). Są to chwyty identyczne pod względem kształtu z ich wersją klasyczną, różnica polega na tym, że dodana została w nich tzw. strefa śliska. Takie rozwiązanie sprawia, że chwyt jest bardziej wymagający dla użytkownika (rys. 25).

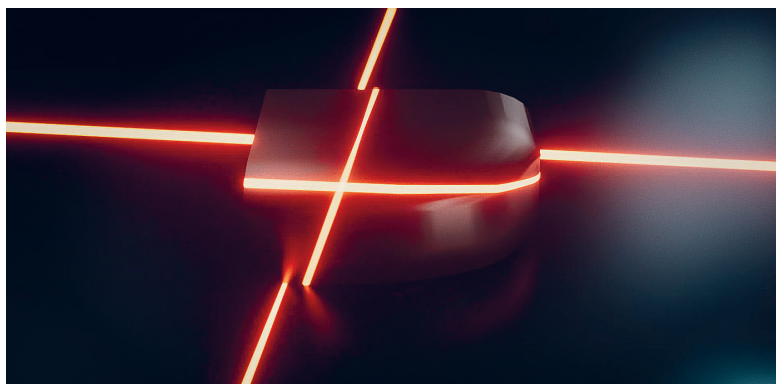


Rys. 25. Chwyt wykonany w technologii *dual-tex*

Źródło: [28]

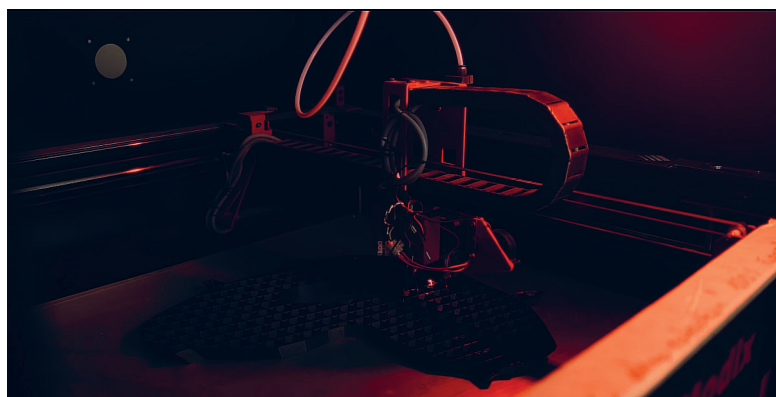
8. WYKORZYSTANIE DRUKU 3D W PROCESIE TWORZENIA

Wraz z rozwojem druku 3D i skanowania 3D technologie te znajdowały zastosowanie w różnych dziedzinach, między innymi w produkcji chwytów wspinaczkowych. Już od kilku lat chwytów poliuretanowe produkuje się, wykorzystując druk 3D [29]. Pozostając przy klasycznej formie projektowania prototypu, wyrzeźbiony model dokładnie skanuje się za pomocą skanera 3D (rys. 26). Następnie informacje są odczytywane, na ich podstawie projektuje się w pełni spersonalizowaną formę odlewniczą, która w dalszej kolejności zostaje wydrukowana na drukarce 3D z wykorzystaniem poliuretanu termoplastycznego (rys. 27). Takie rozwiązanie pozwala na automatyzację procesu produkcyjnego, oszczędność czasu oraz materiału potrzebnego do wykonania formy odlewniczej, którą wystarczy wypełnić żywicą poliuretanową, aby otrzymać gotowy chwyt wspinaczkowy.



Rys. 26. Skanowanie prototypu chwytu wspinaczkowego

Źródło: [26]



Rys. 27. Drukowanie formy do odlewania chwytu

Źródło: [26]

9. ROZWIĄZANIA EKOLOGICZNE STOSOWANE PRZY PRODUKCJI CHWYTÓW

Formy cienkościenne

Formy cienkościenne [30] to wykorzystywane wielokrotnie formy do odlewania chwytów, które utworzone są z silikonu. W tym rozwiązaniu zużycie silikonu zmniejszone jest do absolutnego minimum, a resztki i mniejsze odpady są ponownie wykorzystywane przy procesie tworzenia wkładek do pustych środków. Przykładową formę cienkościenną z silikonu przedstawiono na rysunku 28.

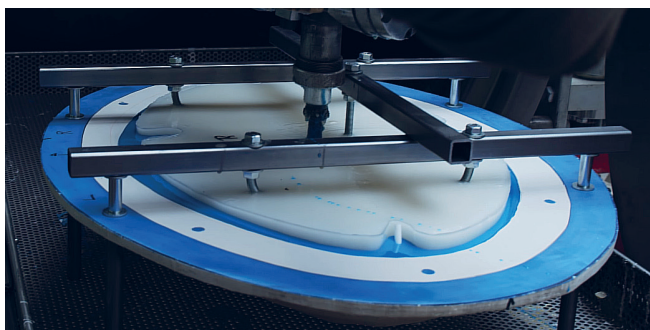


Rys. 28. Formy cienkościenne z silikonu

Źródło: [30]

Technologia *hollowed-back*

Przy wytwarzaniu dużych struktur oraz chwytów wspinaczkowych wykorzystuje się technologię *hollowed-back* (rys. 29). Umożliwia ona ograniczenie ilości materiału potrzebnego do produkcji – chwytów są puste w środku, a ścianki tak grube, na ile to jest wymagane. Dzięki zastosowaniu tej technologii firmy produkujące chwytów są w stanie zużyć nawet do 80% mniej żywicy. Mniejsza masa chwytów ma również pozytywny wpływ na koszty ich transportu.



Rys. 29. Chwyt produkowany w technologii *hollowed-back*

Źródło: [27]

Chwyty drugiego gatunku

Zakłady produkujące chwytyspinalczkowe w celu ograniczenia zanieczyszczeń środowiska wprowadziły na rynek tak zwane chwytyspinalczkowe drugiego gatunku. Są to chwytyspinalczkowe z drobnymi wadami i niedoskonałościami, a także takie, które zostały odlane z pozostałości żywicy z produkcji. Wprowadzenie tego rodzaju rozwiązania ogranicza ilość wytwarzanych przez firmę odpadów i wpisuje się w gospodarkę o obiegu zamkniętym, co sprawia, że jest to bardzo proekologiczne (rys. 30).



Rys. 30. Przykładowe uszkodzenia kwalifikujące chwytyspinalczkowe jako drugi gatunek

Źródło: [31]

10. PODSUMOWANIE

Chwytyspinalczkowe należy projektować ze szczególną dbałością o każdy detal. Podczas procesu produkcji oprócz wymagań projektowo-technicznych istotny jest ich kształt, jakość powierzchni i ergonomia. Trwałość i odporność chwytyspinalczkowych uzyskuje się dzięki innowacyjnej technologii materiału opracowanego na podstawie aktualnie obowiązujących norm. Używany do produkcji chwytyspinalczkowych materiał powinien być najlepszej jakości oraz cechować się najwyższymi parametrami wytrzymałościowymi. Najczęściej stosowana jest czysta żywica poliuretanowa bez wypełniaczy, która zapewnia doskonałą strukturę, niższą masę oraz wysoką wytrzymałość. O wysokiej jakości materiału świadczą dobre parametry techniczne: twardość (80 Shore D), moduł sprężystości (2200 MPa) oraz uderzalność (50 kJ/m²).

W strukturach chwytu należy stosować technologię *dual washer inserts*, polegającą na montowaniu podkładek kompatybilnych ze śrubami stożkowymi oraz imbusowymi. Ponadto chwytły powinny być wyposażone w otwory na spaxy, których zadaniem jest utrzymywanie stabilności i zapobieganie przekręceniu się w trakcie użytkowania. Wszystkie te właściwości sprawiają, że produkowane chwytły wspinaczkowe cechuje najwyższa jakość i gwarantują one bezpieczeństwo podczas uprawiania sportów wyczynowych.

Podziękowania

Artykuł powstał na podstawie wygłoszonego podczas 64. Barbórkowej Konferencji Studenckich Kół Naukowych AGH referatu, który zajął trzecie miejsce w sekcji XVI. Inżynieria produkcji i jakości. Swoje szczerze podziękowania kieruję w stronę Pana dr. inż. Mariusza Niekurza, opiekuna Koła Naukowego „Menadżer Produkcji”. Dziękuję za pomoc i ogromne wsparcie na każdym etapie pracy.

LITERATURA

- [1] Parks J., *How to use rock climbing holds*, <https://rei.com/learn/expert-advice/climbing-holds.html> [dostęp: 25.03.2024].
- [2] Inspire Staff, *Different types of climbing holds*, <https://inspirerock.com/blog/different-types-of-climbing-holds/> [dostęp: 25.03.2024].
- [3] Kong Holds, *Ibex Alpha PU Edges mixed*, https://kongholds.com/holds/climbing-holds/ibex-alpha-pu-edges-mixed__512#miv-1 [dostęp: 25.03.2024].
- [4] Holds Market, *Core Geo Super Slopers*, <https://holdsmarket.com/en/holds/1631-core-geo-super-slopers.html> [dostęp: 25.03.2024].
- [5] Oliunid, *Smog pinches set 01 – 10 climbing holds*, <https://oliunid.com/smog-pinches-set-01-10-climbing-holds.html> [dostęp: 25.03.2024].
- [6] BatHolds, *Plasmatic Jugs XL*, <https://batholds.com/en/produkt/plasmatic-jugs-xl/> [dostęp: 25.03.2024].
- [7] Filth, *Pocket climbing holds*, <https://filthclimbingholds.co.uk/products/holds/pockets/> [dostęp: 25.03.2024].
- [8] Hive Climbing, <https://hiveclimbing.com/wp-content/uploads/2021/05/Screen-Shot-2020-01-24-at-11.50.47-AM-966x675-1.png> [dostęp: 25.03.2024].
- [9] Sport Fun, *Jak wspinąć się w rysach?*, <https://sport-fun.pl/blog/jak-wspinac-sie-w-rysach> [dostęp: 25.03.2024].
- [10] Wide Boyz, *Crack trainer*, <https://wideboyz.com/product/crack-trainer/> [dostęp: 25.03.2024].
- [11] BatHolds, *Domowe ścianki wspinaczkowe*, <https://batholds.com/domowa-scianka-wspinaczkowa/> [dostęp: 25.03.2024].
- [12] Chwytły Wspinaczkowe, *Gniazda do montażu chwytów wspinaczkowych*, <https://chwytly-wspinaczkowe.com/produkt/ak0068-gniazda-do-montazu-chwytow-wspinaczkowych/> [dostęp: 25.03.2024].
- [13] Chwytły Wspinaczkowe, *Śruba z pełnym gwintem, uniwersalna*, <https://chwytly-wspinaczkowe.com/produkt/ak0087-sruba-z-pelnym-gwintem-uniwersalna/> [dostęp: 25.03.2024].

- [14] Chwyty Wspinaczkowe, *BIT końcówka IMBUS 8 mm (do śrub)*, <https://chwyty-wspinaczkowe.com/produkt/ak0074-bit-koncowka-imbus-8-mm-do-srub/> [dostęp: 25.03.2024].
- [15] Chwyty Wspinaczkowe, *Spaxy, wkręty Würth ASSY*, <https://chwyty-wspinaczkowe.com/produkt/ak0091-spaxy-wkrety-wurth-assy/> [dostęp: 25.03.2024].
- [16] Chwyty Wspinaczkowe, *BIT końcówka TX 20 (do spaxów, wkrętów)*, <https://chwyty-wspinaczkowe.com/produkt/ak0090-bit-koncowka-tx-20-do-spaxow-wkretow/> [dostęp: 25.03.2024].
- [17] Barnat W., Miedzińska D., Niezgoda T., *Pianki poliuretanowe – właściwości, zastosowania, recykling*, Archiwum Gospodarki Odpadami i Ochrony Środowiska, t. 13, nr 4, s. 13–17.
- [18] BatHolds, *Technologia*, <https://batholds.com/technologia-material-chwytow-wspinaczkowych/> [dostęp: 25.03.2024].
- [19] Synthesia Technology, *Systemy poliuretanowe do chwytów wspinaczkowych*, <https://blog.synthesia.com/pl/systemy-poliuretanowe-do-chwytow-wspinaczkowych> [dostęp: 25.03.2024].
- [20] STAMAR, *Płyty poliuretan PU*, <https://sklep.stamarpoznan.pl/pl/248-plyty-poliuretan-pu-poliuretanowe> [dostęp: 25.03.2024].
- [21] Smartbizz.pl, *Jak stworzyć własne chwyty wspinaczkowe?*, 2023, <https://smartbizz.pl/chwyty-wspinaczkowe-jak-zrobic/> [dostęp: 25.03.2024].
- [22] Outdoor, *BatHolds – nowy polski producent chwytów wspinaczkowych. Rozmawiamy z Bartkiem Opielą, założycielem marki*, 2020, <https://4outdoor.pl/2020/10/29/batholds-nowy-polski-producent-chwytow-wspinaczkowych-rozmawiamy-z-bartkiem-opiela-zalozycielem-marki/> [dostęp: 25.03.2024].
- [23] Fuss F.K., Niegl G., *Quantification of the grip difficulty of a climbing hold (P142)*, [w:] Estivalet M., Brisson P. (eds.), *The Engineering of Sport 7*, vol. 2, Springer, Paris 2008, s. 19–26, https://doi.org/10.1007/978-2-287-09413-2_3.
- [24] Imiolczyk W., *Skąd się bierze tarcie chwytu wspinaczkowego?*, 2020, <https://batholds.com/skad-sie-bierze-tarcie-chwytu-wspinaczkowego/> [dostęp: 25.03.2024].
- [25] BaRocka, https://barocka.pl/wp-content/uploads/2024/01/IMG_0536-1-Copy.jpg [dostęp: 25.03.2024].
- [26] Błocz Climbing Official, *Inside Błocz full movie*, 2022, <https://youtube.com/watch?v=F-hJKT3eHLwI&t=150s> [dostęp: 25.03.2024].
- [27] Flathold Official, *Flathold workshop*, 2021, <https://youtube.com/watch?v=9o790hsC8WQ> [dostęp: 25.03.2024].
- [28] Chwyty Wspinaczkowe, *ArtLine Fat Vortex 5 DT*, <https://chwyty-wspinaczkowe.com/produkt/al0402-fat-vortex-5-dt/> [dostęp: 25.03.2024].
- [29] Fuss F.K., Niegl G., *Instrumented climbing holds and performance analysis in sport climbing*, Sports Technology, vol. 1, iss. 6, s. 301–313, <https://doi.org/10.1080/19346182.2008.9648487>.
- [30] Holds Team, *Jesteśmy Eko! czyli produkcja chwytów z uwzględnieniem ochrony środowiska*, 2022, <https://batholds.com/eko/> [dostęp: 25.03.2024].
- [31] Escape Climbing, *Factory Seconds*, <https://escapeclimbing.com/products/factory-seconds> [dostęp: 25.03.2024]

Adrianna Golowska*, Alicja Góralczyk*

INNOWACYJNY SYSTEM ŁĄCZENIA FUNDAMENTÓW BEZPOŚRĘDNICH Z KONSTRUKCJAMI CEMENTOGRUNTOWYMI

Artykuł podejmuje temat łączenia fundamentów bezpośrednich obiektów inżynierskich, takich jak np. mosty czy wiadukty, z konstrukcjami cementogruntoowymi wykonanymi w technologii TRENCHMIX®. Ze względu na brak wyznaczonych parametrów kontaktu pomiędzy cementogruntem a betonem przeprowadzono autorskie badanie wytrzymałości na ścinanie w aparacie bezpośredniego ścinania oraz wykonano badania wytrzymałościowe cementogruntu. Następnie wykonano modelowanie trzech kształtów o różnych wymiarach umiejscowionych w cementogrunie w programie FLAC3D. Na koniec wykonano symulacje testów wrywania oraz wybrano najlepszy kształt. Proces analizy numerycznej udało się zautomatyzować dzięki kodowi napisanemu w języku Python.

INNOVATIVE SYSTEM OF INTEGRATING DIRECT FOUNDATIONS WITH CEMENT-SOIL CONSTRUCTIONS

The presentation addresses the topic of integrating the foundations of direct engineering structures such as bridges or viaducts with cement-soil structures made using TRENCHMIX® technology. Due to the lack of designated contact parameters between cement-soil and concrete, an original shear strength study was conducted using a direct shear apparatus, along with strength tests on cement-soil. Subsequently, modeling of three shapes of various dimensions embedded in cement-soil was carried out using the FLAC3D program. Finally, simulations of pull-out tests were performed, and the best shape was selected. The process of numerical analysis was automated using code written in Python.

1. WPROWADZENIE

W ostatnich latach coraz częściej stosuje się technologię TRENCHMIX® jako wzmocnienie gruntów słabonośnych. Projektanci obiektów inżynierskich oczekują, aby momenty zginające oraz siły wrywające były przenoszone na podłoże. Zwykle zapewnia się to dzięki

* AGH Akademia Górniczo-Hutnicza, Wydział Inżynierii Łądowej i Gospodarki Zasobami, Koło Naukowe Budownictwa i Geomechaniki.

powiązaniu zbrojenia posadowienia obiektu ze zbrojeniem wzmocnienia (np. zbrojeniem pała). Ze względu na fakt, że panele cementogruntowe nie są zbrojone, w przedmiotowym projekcie zaproponowano system łączenia fundamentów bezpośrednich obiektów inżynierskich, takich jak np. mosty czy wiadukty, z konstrukcjami cementogruntowymi wykonanymi w technologii TRENCHMIX®

2. MATERIAŁY I METODY

Opis materiałów i metod obejmuje dogłębną analizę warunków geologiczno-inżynierskich lokalizacji, z której pobrano próbki do przeprowadzenia badań laboratoryjnych. Zebrane dane umożliwiły identyfikację składników badanego cementogruntu. Ponadto przedstawiono szczegółowo metody przeprowadzonych badań.

2.1. MATERIAŁY

Próbki cementogruntu do realizacji badań laboratoryjnych zostały pobrane na ulicy Ostatni Etap, która znajduje się na terenie budowy drogi krajowej DK44, stanowiącej obwodnicę Oświęcimia. Do ich wykonania wykorzystano cement CEM II/B-V 32,5 R – HSR.

Analiza warunków geologiczno-inżynierskich na trasie drogi ekspresowej S1 – Mysłowice – Bielsko-Biała

W obrębie wiaduktu kolejowego występują grunty wykształcone w okresie czwartorzędu, a dokładnie w holocenie [1]. W dokumentacji [2] zawarto cztery przekroje poprzeczne, na których wyróżniono siedem warstw geotechnicznych oznaczonych cyframi rzymskimi. W tabeli 1 opisano te warstwy, które pojawiły się na dostępnych przekrojach.

Tabela 1. Zestawienie warstw geotechnicznych

Oznaczenie	Symbol gruntu*	Rodzaj gruntu	Stan gruntu	Wilgotność
IB	NN (Ż, Tł, Ps, Pd, PsH, Gπ)	żwir, tłuczeń, piasek średni, piasek drobny, piasek średni próchniczy, glina pylasta	–	mw, w
IIB	Gπ + cz. org	glina pylasta z domieszką części organicznych	tpl, tpl/pl	mw, mw/w
IIIB	Pg/Gp, Gπ, Pog, Pog/Gp	piasek gliniasty na pograniczu gliny piaszczystej, glina pylasta, pospółka gliniasta, pospółka gliniasta na pograniczu z gliną piaszczystą	tpl	mw
IIIC	Pog, Pog/Gp, Gπ, Gp + Ż	pospółka gliniasta, pospółka gliniasta na pograniczu z gliną piaszczystą, glina pylasta, glina piaszczysta z dodatkiem żwiru	pl, tpl/pl	mw, mw/w

Tabela 1. cd.

Oznaczenie	Symbol gruntu*	Rodzaj gruntu	Stan gruntu	Wilgotność
VD	Ps + Ż, Ps, Ps//Gπ, Ps + Ż//Gπ	piasek średni z domieszką żwiru, piasek średni, piasek średni z przewarstwieniem gliny pylastej, piasek średni z domieszką żwiru z przewarstwieniem gliny pylastej	—	nw
VIC	Po	pospółka	zg	nw
VID	Po, Ps + Ż, Po + G	pospółka, piasek średni z domieszką żwiru, pospółka z domieszką gliny	bzg	nw
VIID	Gπ, Gπ/I	gliny pylaste oraz gliny pylaste na pograniczu z iłami	tpl	mw

* PN-B-02480:1986

Minimalna głębokość stabilizacji zwierciadła wody gruntowej wynosi 3,5 m, a maksymalna 4,2 m. W jednym z przekrojów występuje sączenie na głębokości 1,4 m [2].

Klasyczny trencher miesza grunt na całej długości miecza urabiającego. Głębokość posadowienia paneli cementogruntowych wynosiła do około 18 m p.p.t.

2.2. METODY

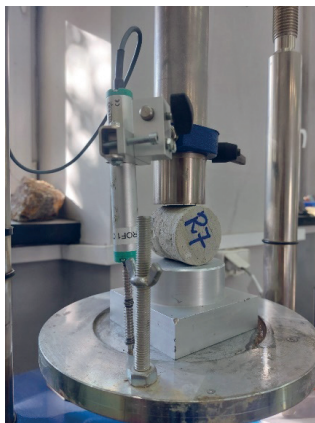
Badania laboratoryjne miały na celu wyznaczenie parametrów kontaktu pomiędzy cementogruntem a prefabrykowanymi elementami betonowymi, tj. kąta tarcia wewnętrznego oraz kohezji, a także wytrzymałości cementogruntu na ściskanie i rozciąganie. Przebadano łącznie 202 próbki, których materiał do badań został pobrany *in situ*. Warto zaznaczyć, że tak pobrany materiał charakteryzuje się mniejszą jednorodnością mieszanki, a także dużą zmiennością parametrów wytrzymałościowych w stosunku do cementogruntu wymieszanego w laboratorium [3].

Badanie wytrzymałości na rozciąganie

Badanie wytrzymałości na rozciąganie wykonano metodą brazylijską (rys. 1), na podstawie normy [4], na siedmiu próbkach walcowych o stosunku długości do średnicy równym 1. Dopuszczono się pewnego odstępstwa, a mianowicie zastosowano wymiar równy 50 mm, którego to norma nie dopuszcza.

Próbki o kształcie walca o średnicy i długości równych 50 mm wycięto z większej płyty cementogruntu po czasie wiązania wynoszącym 28 dni. Przed wykonaniem badania próbki

zmierzono oraz zważono, a samo badanie wykonano w prasie wytrzymałościowej CBR, ze względu na odpowiednią rozdzielczość prasy. Prędkość badania wynosiła 0,090 mm/min, a obciążenie początkowe 0,001 kN.



Rys. 1. Przygotowana próbka do badania wytrzymałości na rozciąganie w prasie wytrzymałościowej CBR

Badanie wytrzymałości na ściskanie

Badanie wytrzymałości na jednoosiowe ściskanie wykonano zgodnie z normą [5]. Próbki walcowe o średnicy równej 50 mm i wysokości 100 mm wycięto z większej płyty cementogruntu po czasie wiązania 28 dni. Przed wykonaniem badania próbki zmierzono oraz zważono. Tak przygotowane próbki umieszczano między płytami dociskowymi prasy wytrzymałościowej CBR (rys. 2) z automatyczną rejestracją siły i przemieszczeń. Próbki obciążano ze stałą prędkością równą 0,15 mm/min aż do zniszczenia. Założono obciążenie początkowe równe 0,001 kN.



Rys. 2. Przygotowana próbka do badania wytrzymałości na ściskanie w prasie wytrzymałościowej CBR

Badanie wytrzymałości na ścinanie

Brak norm i nieliczne badania dotyczące parametrów kontaktu pomiędzy cementogruntem a prefabrykowanymi elementami betonowymi sprawiają, że wykonane badanie wytrzymałości na ścinanie można uznać za autorskie, a jego przebieg nie jest unormowany. Badanie przeprowadzono w aparacie bezpośredniego ścinania na próbkach, w przypadku których kontakt pomiędzy dwoma materiałami nie był naruszony. Dodatkowo próbki podzielono na takie, które łączyły się z cementogruntem powierzchnią chropowatą oraz płaską.

Badane próbki miały kształt prostopadłościanu o wymiarach $6,0\text{ cm} \times 6,0\text{ cm} \times \text{ok. } 2,0\text{ cm}$. Składały się z betonu architektonicznego o grubości $1,0\text{ cm}$ oraz cementogruntu. Wysokość próbki była uzależniona od karetki, w której wykonywano badanie. Próbkę wykonywano w styropianowych formach, w których umieszczano betonową płytkę (wyciętą z betonu architektonicznego), a następnie zalewano cementogruntem. Próbkę wiązały przez 28 dni w laboratorium, a po tym czasie wykonywano badanie wytrzymałościowe w aparacie bezpośredniego ścinania.

Ze względu na brak dostępnych norm wykonano badanie próbne, które miało określić stałą prędkość przesuwania skrzynki. Czas wykonywanego badania ograniczono do 12 min, a prędkość ścinania przyjęto równą $0,5\text{ mm/min}$. Warto zaznaczyć, że prędkość ta nie ma tak dużego znaczenia jak w przypadku gruntów, gdy jej wartość zależy od rodzaju gruntu oraz metody badań [6]. Ponadto przyjęto wartość graniczną przemieszczenia jako 6 mm , co stanowi 10% długości boku próbki. Badanie wykonano dla czterech różnych naprężeń pionowych, tj. 100 kPa , 200 kPa , 300 kPa i 400 kPa . W badaniu kluczowe było ustawienie próbki, tak aby ścięcie zachodziło na kontakcie dwóch materiałów. Na rysunku 3 przedstawiono prawidłowe ustawienie próbki.



Rys. 3. Prawidłowe ustawienie próbki w aparacie bezpośredniego ścinania

3. WYNIKI

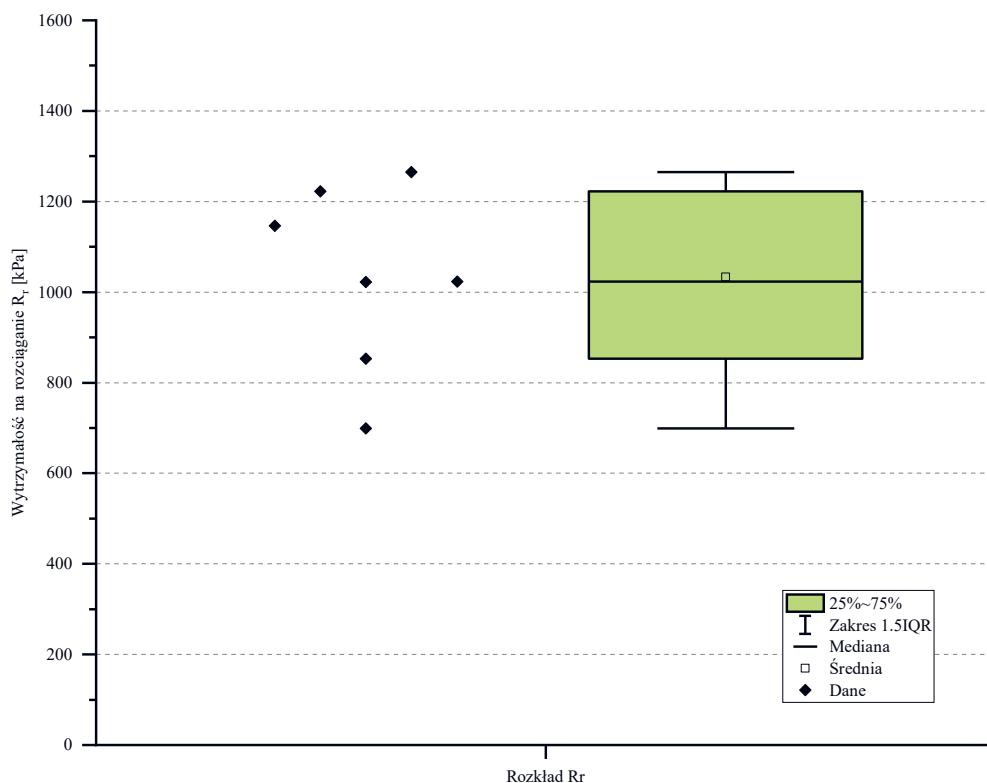
3.1. BADANIA WYTRZYMAŁOŚCI NA ROZCIĄGANIE

W przypadku badanych próbek wyznaczono gęstość objętościową i ciężar objętościowy, a wyniki przedstawiono w tabeli 2. Wartości obliczonych gęstości wahają się w granicach od $1651,707\text{ kg/m}^3$ do $1767,521\text{ kg/m}^3$, a ich średnia wynosi $1710,059\text{ kg/m}^3$. Natomiast wartości obliczonego ciężaru objętościowego zawierają się w przedziale od $16,203\text{ kN/m}^3$

do $17,339 \text{ kN/m}^3$, a ich średnia jest równa $16,776 \text{ kN/m}^3$. Wartości wytrzymałości na rozciąganie mieszczą się w zakresie od $698,778 \text{ kPa}$ do $1265,359 \text{ kPa}$ (rys. 4). Średnia wartość wytrzymałości wynosi $1032,886 \text{ kPa}$, natomiast mediana – $1022,893 \text{ kPa}$.

Tabela 2. Zestawienie gęstości objętościowej i ciężaru objętościowego próbek

Próbki	Masa [kg]	Objętość [m ³]	Gęstość objętościowa [kg/m ³]	Ciężar objętościowy [kN/m ³]
P1	0,183	0,000110	1657,601	16,261
P2	0,197	0,000111	1767,313	17,337
P3	0,181	0,000109	1651,707	16,203
P4	0,195	0,000111	1758,264	17,249
P5	0,188	0,000111	1697,093	16,648
P6	0,184	0,000110	1670,912	16,392
P7	0,195	0,000110	1767,521	17,339
Średnia arytmetyczna			1710,059	16,776



Rys. 4. Wartości wytrzymałości na rozciąganie

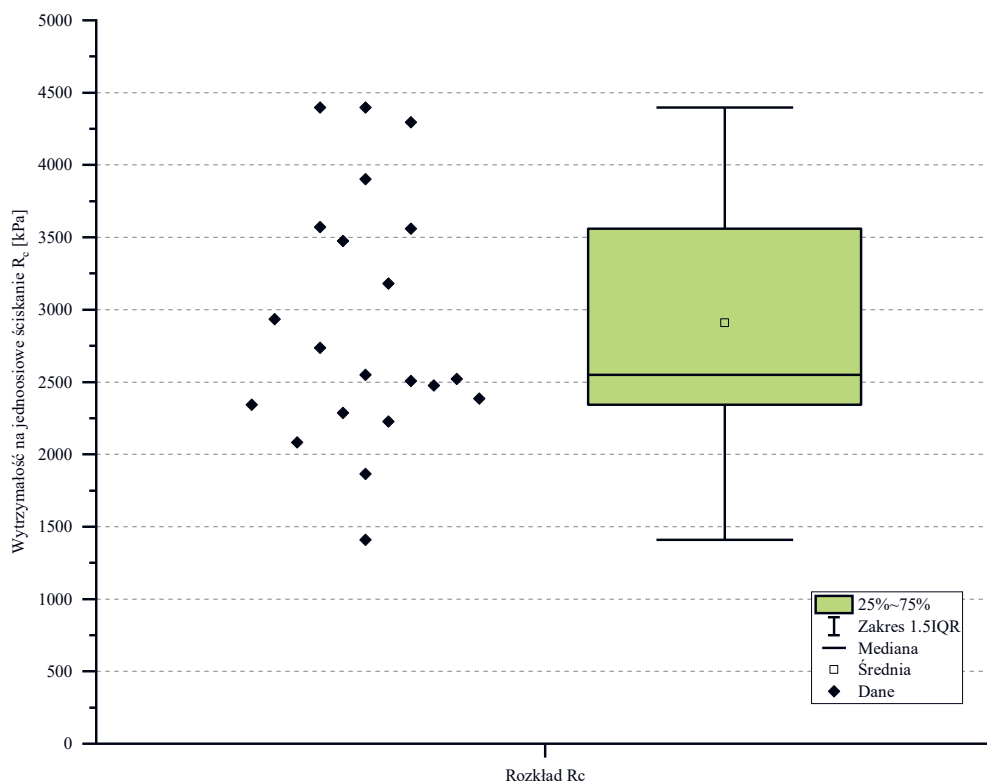
3.2. BADANIE WYTRZYMAŁOŚCI NA ŚCISKANIE

W przypadku badanych próbek wyznaczono gęstość objętościową i ciężar objętościowy, a wyniki przedstawiono w tabeli 3. Zakres gęstości objętościowej zawiera się w przedziale od 1695,386 kg/m³ do nawet 1926,615 kg/m³, natomiast zakres wartości ciężaru objętościowego waha się w granicach od 16,632 kN/m³ do 18,900 kN/m³.

Tabela 3. Zestawienie gęstości objętościowej i ciężaru objętościowego próbek

Próbki	Masa [kg]	Objętość [m ³]	Gęstość objętościowa [kg/m ³]	Ciężar objętościowy [kN/m ³]
W1	0,38298	0,000219	1747,600	17,144
W2	0,38458	0,000221	1740,548	17,075
W3	0,38674	0,000219	1762,643	17,292
W4	0,42251	0,000222	1901,814	18,657
W5	0,40229	0,000221	1822,218	17,876
W6	0,37649	0,000220	1708,600	16,761
W7	0,39762	0,000220	1809,707	17,753
W8	0,38456	0,000220	1745,472	17,123
W9	0,39535	0,000218	1811,276	17,769
W10	0,37883	0,000220	1721,614	16,889
W11	0,42600	0,000221	1926,615	18,900
W12	0,41155	0,000219	1877,239	18,416
W13	0,37636	0,000222	1698,827	16,666
W14	0,41425	0,000220	1879,663	18,440
W15	0,38351	0,000220	1743,813	17,107
W16	0,38696	0,000221	1754,267	17,209
W17	0,30713	0,000181	1701,313	16,690
W18	0,30884	0,000179	1721,725	16,890
W19	0,39915	0,000224	1782,411	17,485
W20	0,32261	0,000183	1758,349	17,249
W21	0,30892	0,000182	1695,386	16,632
Średnia arytmetyczna			1776,719	17,430

Rysunek 5 przedstawia rozkład wartości wytrzymałości na jednoosiowe ściskanie. Wartości te wahają się w granicach od 1791,7 kPa do nawet 4400,46 kPa. Różnica pomiędzy najniższą wartością a najwyższą wynosi 2608,76 kPa, co wskazuje na duży rozrzut wyników badań. Średnia wartość wynosi 2824,55 kPa, a mediana 2521,95 kPa.



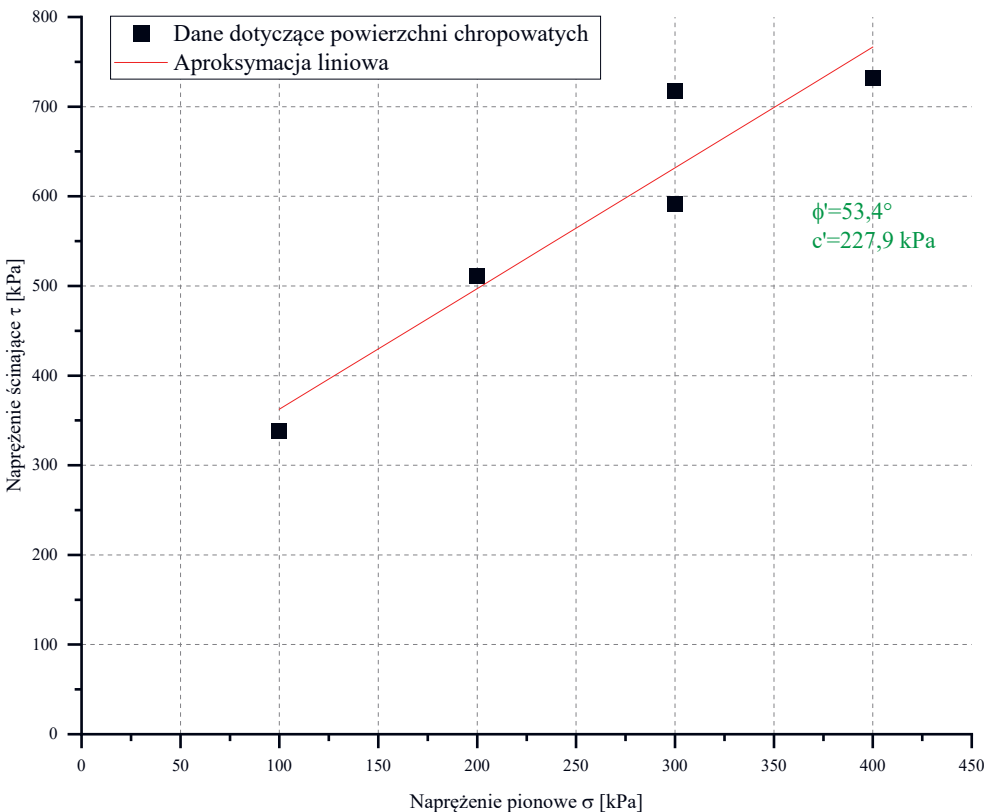
Rys. 5. Wartości wytrzymałości na ściskanie

3.3. BADANIE WYTRZYMAŁOŚCI NA ŚCINANIE

W celu wyznaczenia kąta tarcia wewnętrznego oraz kohezji zastosowano aproksymację liniową, dzięki której została wyznaczona prosta najlepiej przybliżająca punkty odpowiadające wynikom badań. Miejsce przecięcia się tej prostej z osią pionową wskazuje na wartość kohezji, natomiast nachylenie – kąt tarcia wewnętrznego.

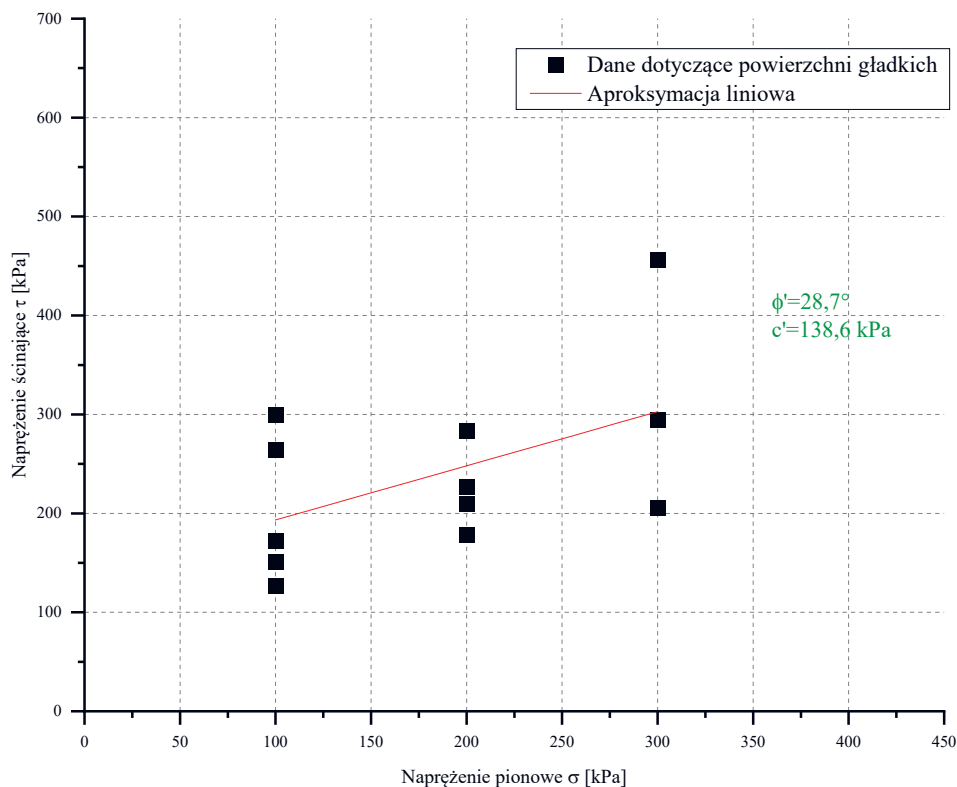
Wyniki przedstawiono na dwóch wykresach (rys. 6 i 7), wyróżniając w ten sposób wyniki dotyczące próbek o powierzchni chropowatej i gładkiej. Warto zauważyć, że parametry kontaktu próbek o powierzchni chropowatej są wyższe w porównaniu z próbkami o powierzchni gładkiej. Wartość różnicy kąta tarcia wewnętrznego między tymi dwoma rodzajami powierzchni wynosi $24,7^\circ$, a w przypadku kohezji 89,3 kPa. Po zakończeniu badania na

powierzchni kontaktu w przypadku próbek o powierzchni chropowatej, po stronie cemento-gruntu, obserwowano wyraźne bruzdy powstałe na skutek żłobienia, które świadczą o silnym kontakcie pomiędzy dwoma materiałami, czego nie zaobserwowano w przypadku próbek o powierzchni gładkiej. Należy jednak podkreślić, że w przypadku wariantu z chropowatą powierzchnią przebadano niewielką liczbę próbek, co może mieć wpływ na uzyskane wyniki (szczególnie w aspekcie bardzo wysokiego kąta tarcia).



Równanie	$y = a + bx$
Wyraz wolny	$227,882 \pm 74,10096$
Nachylenie	$1,34624 \pm 0,26532$
Resztowa suma kwadratów	10 981,90595
Współczynnik Pearsona r	0,94638
Współczynnik determinacji	0,89563
Skorygowany współczynnik determinacji	0,86085

Rys. 6. Wykres zależności naprężeń stycznych od naprężeń normalnych próbek o powierzchni chropowatej

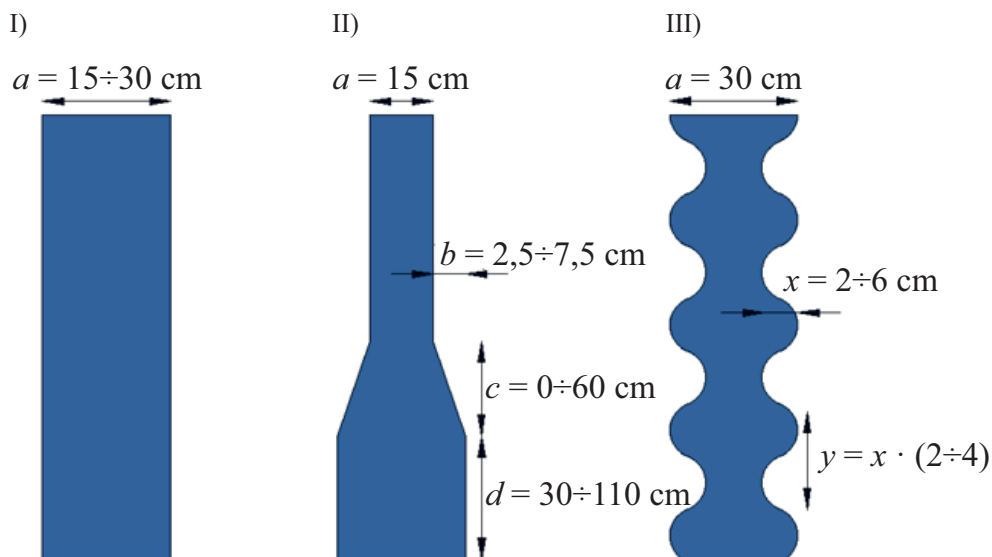


Równanie	$y = a + bx$
Wyraz wolny	$138,59824 \pm 57,89159$
Nachylenie	$0,54732 \pm 0,28946$
Resztowa suma kwadratów	64 235,86636
Współczynnik Pearsona r	0,5132
Współczynnik determinacji	0,26337
Skorygowany współczynnik determinacji	0,18971

Rys. 7. Wykres zależności naprężeń stycznych od naprężeń normalnych próbek o powierzchni gładkiej

4. ZAŁOŻENIA BADANIA NUMERYCZNEGO

W artykule poddano analizie trzy kształty łączników przedstawionych na rysunku 8, tj. kształt walca (I), walca o poszerzonej końcówce (II) i sinusoidalny (III). Następnie sparametryzowano ich wymiary. Po konsultacji z projektantem z firmy Soley przyjęto stałą wysokość 3 m oraz maksymalną szerokość całkowitą łącznika 30 cm. Na rysunku 8 przedstawiono kształty i wymiary łączników.

**Rys. 8.** Kształty i wymiary łączników:

I – kształt walca; II – kształt walca z poszerzoną końcówką; III – kształt sinusoidalny

W tabelach 4–6 przedstawiono wymiary analizowanych łączników oraz nadano im nazwę.

Tabela 4. Wymiary z łączników z grupy I

Grupa I			
Nazwa	Parametr a [m]	Nazwa	Parametr a [m]
I.0	0,15	I.8	0,23
I.1	0,16	I.9	0,24
I.2	0,17	I.10	0,25
I.3	0,18	I.11	0,26
I.4	0,19	I.12	0,27
I.5	0,20	I.13	0,28
I.6	0,21	I.14	0,29
I.7	0,22	I.15	0,30

Tabela 5 cd.
Tabela 5. Wymiary łączników z grupy II

Grupa II							
Nazwa	Parametr [m]			Nazwa	Parametr [m]		
	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>d</i>		<i>b</i>	<i>c</i>	<i>d</i>
II.0	0,025	0	0,3	II.18	0,050	0,40	0,7
II.1	0,025	0,2	0,3	II.19	0,050	0,60	0,7
II.2	0,025	0,4	0,3	II.20	0,050	0,0	1,1
II.3	0,025	0,6	0,3	II.21	0,050	0,2	1,1
II.4	0,025	0,0	0,7	II.22	0,050	0,4	1,1
II.5	0,025	0,2	0,7	II.23	0,050	0,6	1,1
II.6	0,025	0,4	0,7	II.24	0,075	0,0	0,3
II.7	0,025	0,6	0,7	II.25	0,075	0,2	0,3
II.8	0,025	0,0	1,1	II.26	0,075	0,4	0,3
II.9	0,025	0,2	1,1	II.27	0,075	0,6	0,3
II.10	0,025	0,4	1,1	II.28	0,075	0,0	0,7
II.11	0,025	0,6	1,1	II.29	0,075	0,2	0,7
II.12	0,05	0,0	0,3	II.30	0,075	0,4	0,7
II.13	0,05	0,2	0,3	II.31	0,075	0,6	0,7
II.14	0,05	0,4	0,3	II.32	0,075	0,0	1,1
II.15	0,05	0,6	0,3	II.33	0,075	0,2	1,1
II.16	0,05	0,0	0,7	II.34	0,075	0,4	1,1
II.17	0,05	0,2	0,7	II.35	0,075	0,6	1,1

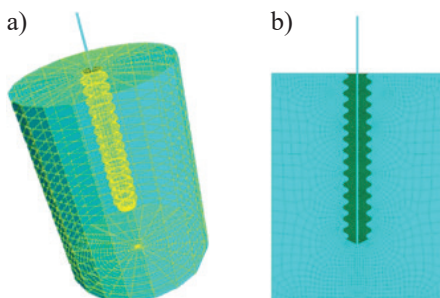
Tabela 6. Wymiary z łączników z grupy III

Grupa III		
Nazwa	Parametr <i>x</i> [m]	Parametr <i>y</i> [m]
III.0	0,02	0,04
III.1	0,02	0,06
III.2	0,02	0,08
III.3	0,03	0,06
III.4	0,03	0,09
III.5	0,03	0,12
III.6	0,04	0,08

Tabela 6 cd.

III.7	0,04	0,12
III.8	0,04	0,16
III.9	0,05	0,10
III.10	0,05	0,15
III.11	0,05	0,20
III.12	0,06	0,12
III.13	0,06	0,18
III.14	0,06	0,24

Wokół łączników zamodelowano cementogrunt o wysokości 4 m oraz średnicy 3 m. Na rysunku 9a pokazano model w 3D, a na rysunku 9b jego przekrój. W łączniku zamodelowano pręt o długości 2,7 m, w którym monitorowano wartość siły wyrywającej. Symulacje ustawiono na 150 000 cykli, przy założeniu, że w każdym cyklu pręt przemieszcza się o 0,001 mm, czyli ostateczne przemieszczenie wynosi 15 cm (5% długości łącznika).



Rys. 9. Model 3D (a) i przekrój modelu (b)

Kolejnym etapem był wybór modelu konstytutywnego do opisania poszczególnych materiałów. W przypadku cementogruntu zdecydowano się na model Coulomba–Mohra, a w przypadku łącznika na model sprężysty. Podobne podejście przyjęto w innych źródłach [7, 8], ze względu na to, że bada się wpływ kształtu łącznika na zniszczenia i naprężenia w cementogrunie, a nie zniszczenia samego łącznika. Dodatkowo zamodelowano interfejs na połączeniu dwóch materiałów, a parametry do jego poprawnego opisania przyjęto z autorskich badań laboratoryjnych na wytrzymałość na ścinanie.

Przyjęto następujące parametry w przypadku modelowanych elementów:

– interfejs pomiędzy łącznikiem a cementogruntem:

- kąt tarcia wewnętrzny – 31° ,
- kohezja – 127 kPa,
- sztywność normalna – 900 MPa,
- sztywność styczna – 900 MPa;

- pręt:
 - gęstość 7850 kg/m^3 ,
 - moduł Younga – 210 GPa ,
 - pole przekroju – $7,06858 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2$,
 - moment bezwładności względem osi x oraz y – $3,976 \cdot 10^{-8} \text{ m}^4$,
 - stała skręcania – $7,952 \cdot 10^{-8} \text{ m}^4$;
- łącznik:
 - gęstość – 240 kg/m^3 ,
 - moduł Younga – $31,4 \text{ GPa}$,
 - współczynnik Poissona – $0,18$;
- cementogrunt:
 - gęstość – 1780 kg/m^3 ,
 - moduł Younga – 90 GPa ,
 - współczynnik Poissona – $0,22$,
 - kąt tarcia wewnętrznego – 0° ,
 - kohezja – 450 kPa ,
 - wytrzymałość na rozciąganie – 90 kPa .

Symulacje wykonano w programie FLAC3D 9.0.0, który umożliwia programowanie w języku Python. Pozwoliło to na automatyczne wygenerowanie bazy danych wymiarów kształtów łączników, a następnie stworzenie modelu 3D. Kolejnym krokiem było wykonanie obliczeń oraz eksport najistotniejszych wyników do pliku Excel, co na dalszym etapie ułatwiło analizę wyników. Dzięki napisanemu kodowi udało się zautomatyzować proces i przeprowadzić łącznie 83 symulacje.

Obliczenia w przypadku kształtu walcowego przeprowadzono w trybie dużych oraz małych odkształceń. W programie FLAC3D tryb dużych odkształceń odnosi się do trybu obliczeń, w którym uwzględniane są zmiany geometrii siatki. Gdy wyłączymy ten tryb, pozycje węzłów pozostają niezmiennione, a obliczenia naprężeń i odkształceń są wykonywane przy użyciu pierwotnej siatki modelu. W tym trybie dokonywane są również dodatkowe obliczenia, takie jak korekta rotacji w przyrostach naprężeń w siatce.

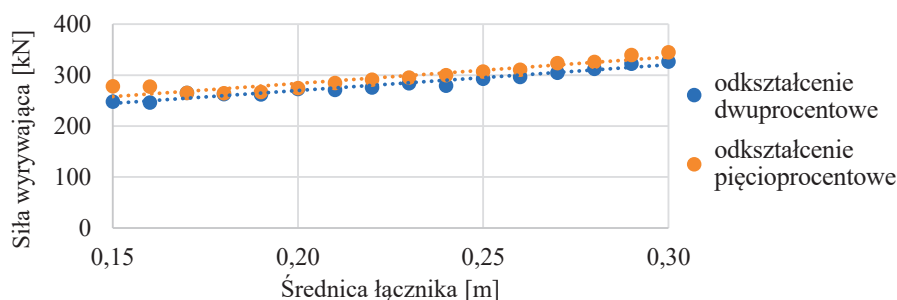
W modelach, w których dochodzi do dużych odkształceń, strefy mogą ulec skrajnym odkształceniom, co prowadzi do powstania geometrycznie niedopuszczalnych warunków, takich jak zerowa objętość elementu. W takiej sytuacji obliczenia programu zostają zatrzymane i stało się tak w przypadku kształtu II oraz III.

5. WYNIKI ANALIZY NUMERYCZNEJ

Sumarycznie udało się przeprowadzić 83 symulacje dotyczące trzech kształtów łączników zamodelowanych w modelu sprężystym.

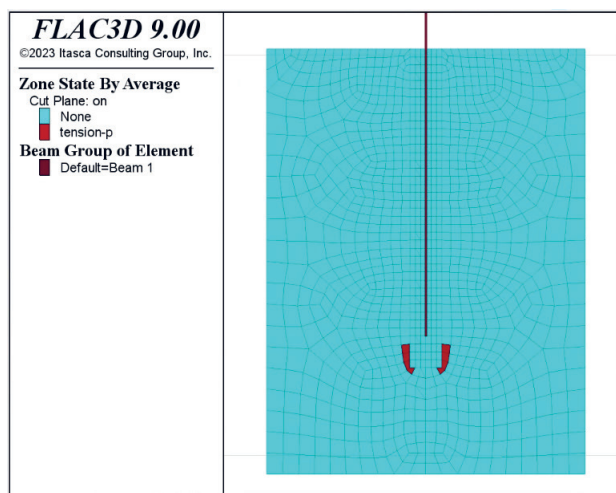
5.1. WYNIKI ANALIZY KSZTAŁTÓW WALCOWYCH

Na rysunku 10 przedstawiono maksymalne siły wyrywające kształtów walcowych przy odkształceniach wynoszących 2% oraz 5%, w trybie małych odkształceń. Analizując wykres, można zauważyć liniowy przyrost wartości maksymalnej siły wyrywającej. Maksymalne siły uzyskano w przypadku łączników o największej średnicy – wynika to z rosnącej wraz ze średnicą powierzchni kontaktu.



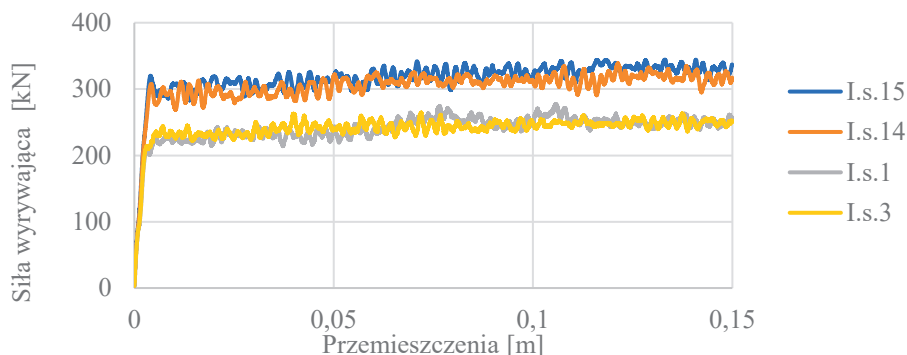
Rys. 10. Zależność maksymalnej siły wyrywającej od średnicy łącznika o kształcie walca przy odkształceniach wynoszących 2% oraz 5% (tryb małych odkształceń)

Strefy uplastycznienia z wyłączeniem elementów kontaktowych przedstawiono na rysunku 11. Należy zauważyć, że do uplastycznienia dochodzi jedynie w kilku strefach cementogruntu oznaczonych kolorem czerwonym (zniszczenie na skutek rozciągania). Przy założeniu sprężystego zachowania się materiału łącznika zniszczenie zachodzi jedynie na kontakcie pomiędzy powierzchnią łącznika i cementogruntem.



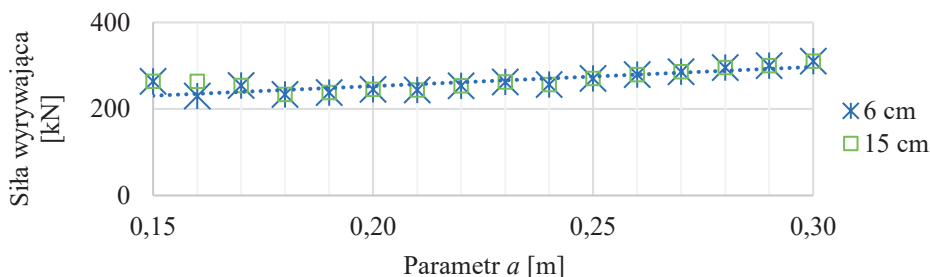
Rys. 11. Strefa uplastycznień walca o średnicy 30 cm (tryb małych odkształceń)

Na rysunku 12 zaprezentowano zależność siły wyrywającej od przemieszczeń w przypadku czterech łączników. Wybrano po dwa łączniki o najwyższej i najniższej sile wyrywającej przy odkształceniu wynoszącym 5%. Moment całkowitego uplastycznienia kontaktu jest dobrze widoczny w miejscu rozpoczęcia oscylacji siły wyrywającej.



Rys. 12. Zależność siły wyrywającej od przemieszczeń w przypadku wybranych walców (tryb małych odkształceń) – zakres do 5% odkształcenia

Drugim wariantem wykonanych obliczeń dotyczących kształtu walca był tryb dużych odkształceń. Wyniki dotyczące wszystkich analizowanych średnic przedstawiono na rysunku 13.

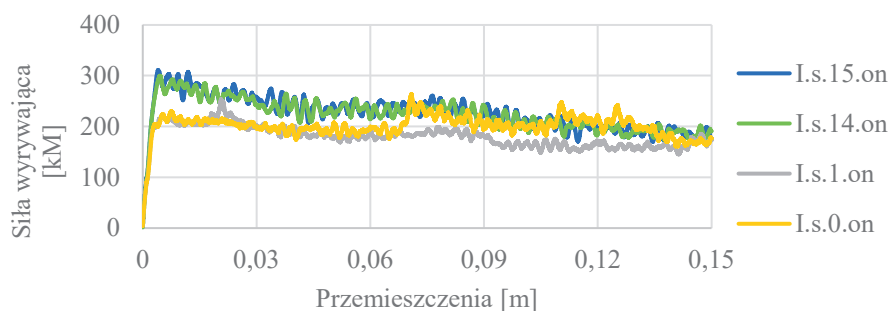


Rys. 13. Zależność siły wyrywającej od przemieszczeń w przypadku wybranych walców (tryb małych odkształceń) – zakres do 5% odkształcenia

Analizując rysunek 13, należy zauważyć, że wartości sił maksymalnych nieznacznie spadły w porównaniu z obliczeniami z wyłączonym trybem dużych odkształceń. Ponadto w większości przypadków siły wyrywające dla odkształceń wynoszących 2% i 5% pokrywają się. Wyjątkiem jest walec o średnicy 16 cm.

Porównując wyniki otrzymane w efekcie zastosowania trybu dużych i małych odkształceń, można dojść do wniosku, że w trybie małych odkształceń dochodzi do nieuzasadnionego przyrostu siły wyrywającej wraz z postępującym przemieszczeniem łącznika (nieuzasadnione umocnienie materiału).

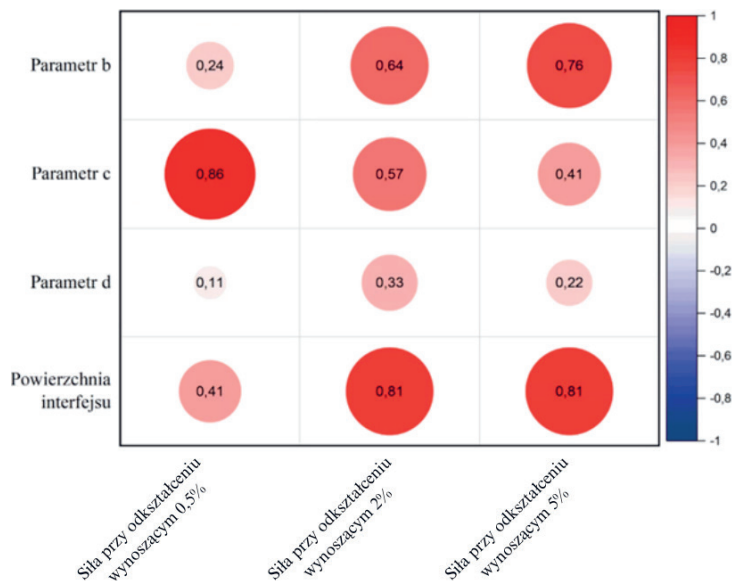
Największą różnicę pomiędzy obliczeniami w trybie małych i dużych odkształceń można zaobserwować na wykresie przedstawiającym zależność sił wyrywających od przemieszczeń (rys. 14). Włączenie trybu dużych odkształceń spowodowało, że pomimo oscylacji wartość sił wyrywających lekko spada wraz z przemieszczeniem.



Rys. 14. Zależność siły wyrywającej od przemieszczeń w przypadku wybranych walców (tryb dużych odkształceń) – zakres do 5% odkształcenia

5.2. WYNIKI ANALIZY KSZTAŁTÓW WALCA Z POSZERZONĄ KOŃCÓWKĄ

Kształt walca z poszerzoną końcówką powoduje zmianę w sposobie pracy łącznika. W celu dokładnego prześledzenia pracy łącznika wygenerowano macierz korelacji pomiędzy parametrami definiującymi geometrię łącznika i siłą wyrywającą w różnych fazach odkształcenia (rys. 15).

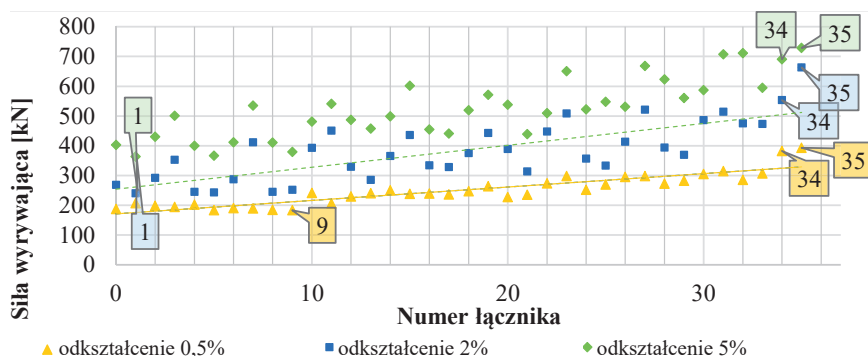


Rys. 15. Macierz korelacji pomiędzy parametrami opisującymi kształt walca o poszerzonej końcówce a maksymalną siłą wyrywającą przy odkształceniach wynoszących 0,5%, 2% i 5%

Macierz korelacji ukazuje wpływ danego parametru na inny. Współczynnik korelacji równy -1 oznacza idealną odwrotną proporcjonalność między dwiema seriami danych, natomiast współczynnik korelacji równy 1 wskazuje na bezpośrednią proporcjonalność między dwiema seriami danych.

Analizując rysunek 15, należy zauważyć, że w początkowej fazie wrywania (odkształcenie wynoszące maksymalnie $0,5\%$) największym współczynnikiem korelacji do siły wrywania charakteryzuje się parametr c . Oznacza to, że w początkowej fazie siła mobilizuje się na pochylonej części klina łącznika. Występuje tam największy docisk, więc mamy do czynienia z najlepiej oddziałującym interfejsem. Następnie wraz ze wzrostem odkształcenia spada znaczenie parametru c , a wzrasta parametru b , który decyduje o wielkości poszerzenia końcówki. Wynika to z tego, że w drugiej fazie zniszczenie zachodzi już w cementogruncie, dlatego im większa wartość parametru b , tym większy tworzy się klin zniszczenia w cementogruncie i tym większą mobilizuje się siłę.

Na rysunku 16 przedstawiono maksymalne siły wrywające w przypadku poszczególnych numerów łączników przy odkształceniach wynoszących $0,5\%$, 2% oraz 5% . Do dalszej analizy wybrano po dwa kształty, które przeniosły największe obciążenia ($0,5\%$, 2% oraz 5% odkształceń) oraz po jednym, który przenosił najmniejsze obciążenia ($0,5\%$, 2% oraz 5% odkształceń).

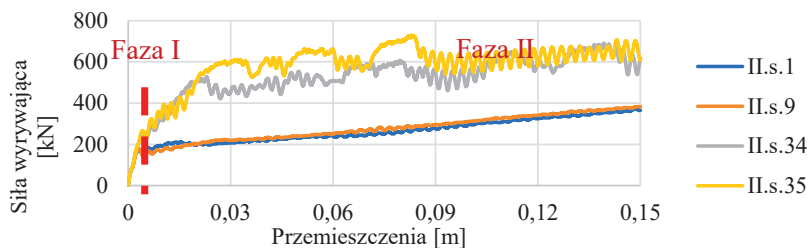


Rys. 16. Zależność maksymalnej siły wrywającej w przypadku poszczególnych numerów łączników o kształcie walca z poszerzoną końcówką przy odkształceniach wynoszących $0,5\%$, 2% oraz 5%

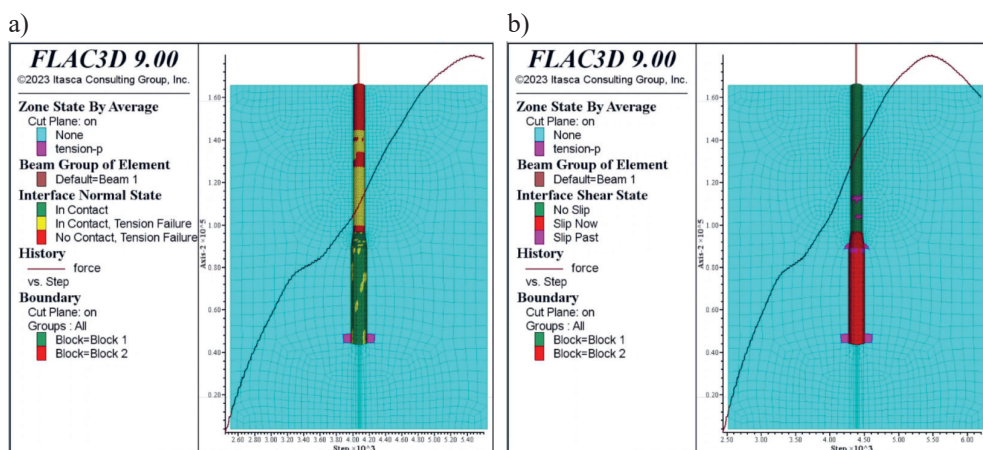
Na rysunku 17 przedstawiono, jak w przypadku wybranych łączników siła wrywająca zmienia się w zależności od przemieszczeń. W początkowej fazie I obserwuje się gwałtowny przyrost siły, który w momencie przejścia do fazy II pracy łącznika łagodnieje.

Schemat zniszczeń wygląda podobnie w przypadku wszystkich łączników i przedstawiono go na przykładzie łącznika II.9. W momencie przejścia z fazy I do fazy II pracy łącznika (zaznaczone na rysunku czerwoną przerywaną linią) pojawia się uplastycznienie elementów kontaktu spowodowane naprężeniami stycznymi w górnej części łącznika oraz występuje całkowite uplastycznienie elementów kontaktu spowodowane naprężeniami stycznymi na poszerzonej końcówce (rys. 18b).

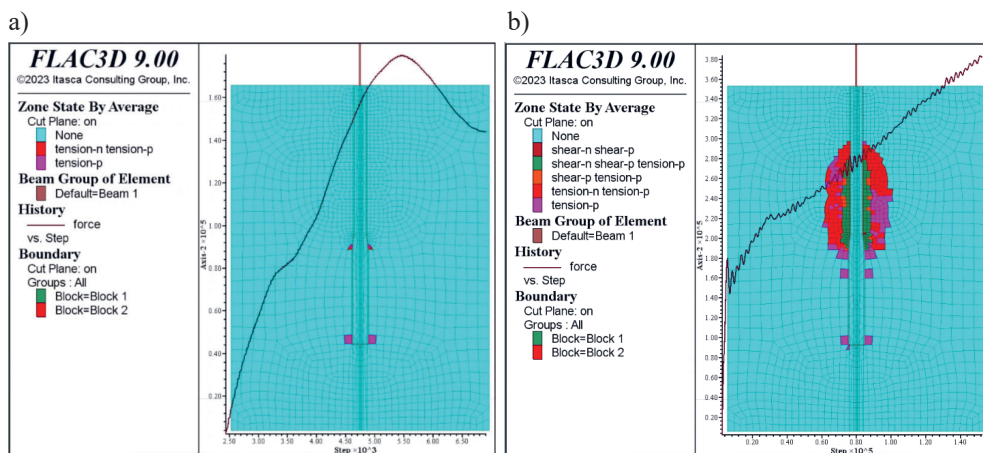
W fazie II pojawiają się pierwsze zniszczenia w cementogruncie, które wraz z kolejnymi cyklami obliczeniowymi postępują wzdłuż górnej części łącznika (rys. 19).



Rys. 17. Zależność siły wrywającej od przemieszczeń w przypadku wybranych walców o poszerzonej końcówce – zakres do 5% odkształcenia



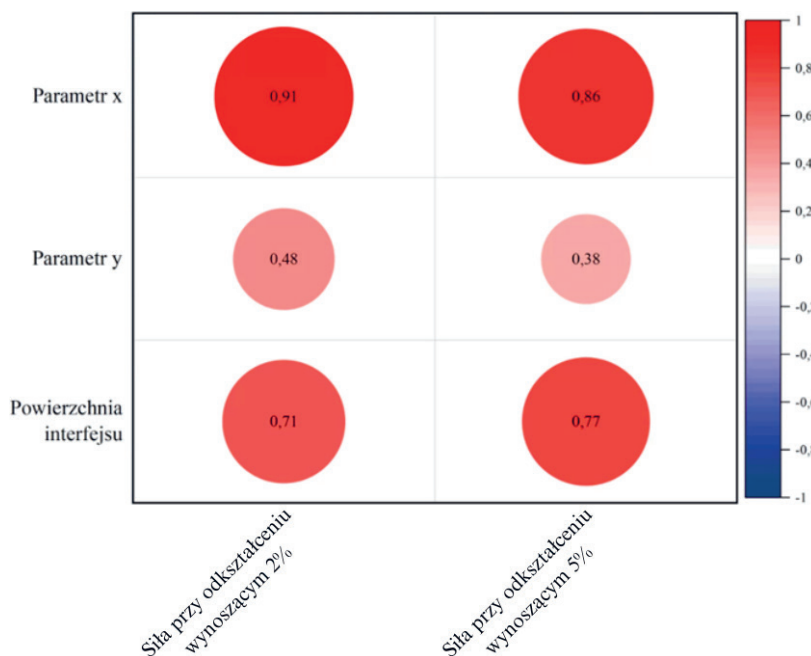
Rys. 18. Uplastycznienia elementów kontaktu na początku fazy II (łącznik II.9): a) spowodowane naprężeniami normalnymi; b) spowodowane naprężeniami stycznymi



Rys. 19. Strefa uplastycznień (łącznik II.9) w: a) pierwszej fazie symulacji; b) drugiej fazie symulacji

5.3. WYNIKI ANALIZY KSZTAŁTÓW SINUSOIDALNYCH

Na rysunku 20 przedstawiono macierz korelacji dla parametrów geometrycznych oraz siły wyrywania przy różnych odkształceniach. Analizując rysunek 20, należy stwierdzić, że największe znaczenie dla wartości siły wyrywającej ma parametr x , a więc amplituda sinusoidy. Parametr y (okres sinusoidy) ma mniejsze znaczenie zarówno w przypadku odkształcenia wynoszącego 2%, jak i 5%.



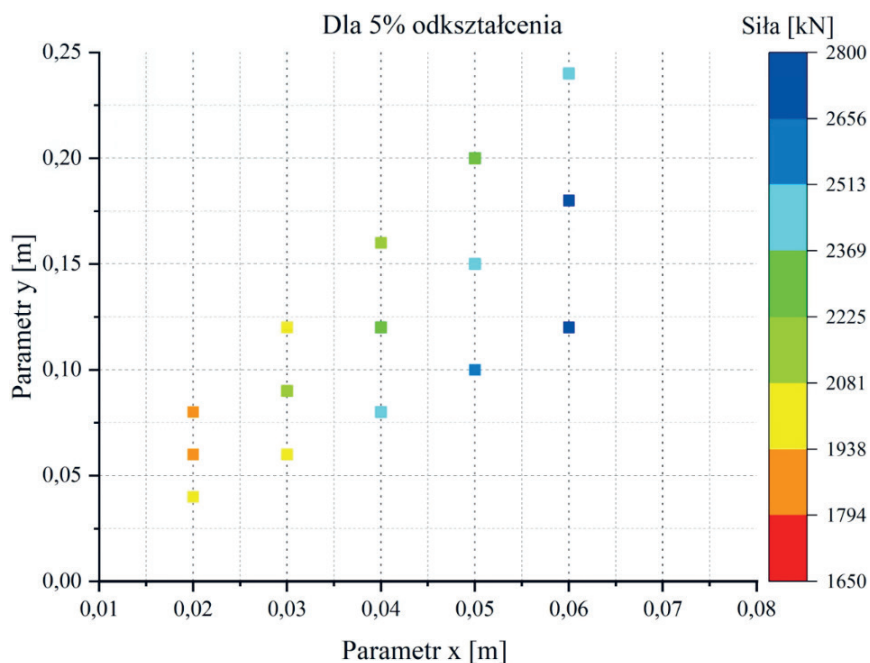
Rys. 20. Macierz korelacji pomiędzy parametrami opisującymi kształt sinusoidalny a maksymalną siłą wyrywającą przy odkształceniach wynoszących 2% i 5%

Na rysunku 21 przedstawiono zależności pomiędzy parametrami x i y w kontekście maksymalnej siły wyrywającej przy odkształceniu wynoszącym 5%. Obserwuje się, że wraz ze zwiększeniem wartości parametru x (amplituda) maksymalna siła wyrywająca wzrasta. Jednocześnie w miarę wzrostu parametru y (okres), dla ustalonej wartości x , maksymalna siła wyrywająca spada.

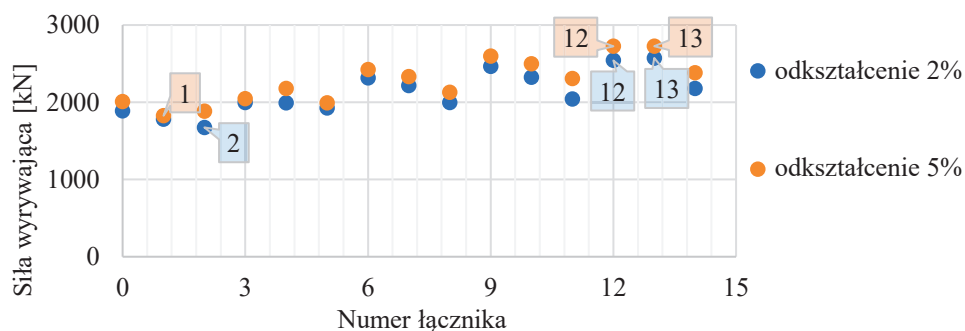
Maksymalne siły wyrywające w przypadku poszczególnych numerów łączników przy odkształceniach wynoszących 2% i 5% przedstawiono na rysunku 22. Do dalszej analizy wybrano po dwa kształty, które przeniosły największe obciążenia (w przypadku odkształceń wynoszących 0,5%, 2% oraz 5%) oraz po jednym, który przenosił najmniejsze odciążenia (w przypadku odkształceń wynoszących 0,5%, 2% oraz 5%).

Rysunek 23 przedstawia zależność pomiędzy siłą wyrywającą i przemieszczeniami łącznika. Na wykresie można zaobserwować duży wzrost siły wyrywającej (faza I), po czym (w wyniku

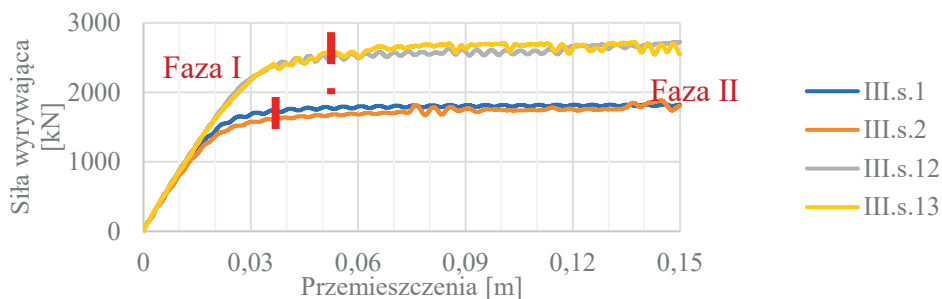
przekroczenia pewnej wartości siły wrywającej) następuje stabilizacja (faza II). W fazie II cementogrunt znajdujący się pomiędzy „ząbkami” łącznika uległ już zniszczeniu, dlatego nie obserwuje się przyrostu siły. W przypadku łącznika numer 13 można zaobserwować, że po przekroczeniu granicy około 4 cm dochodzi do całkowitego zniszczenia cementogruntu i pomimo dalszego wzrostu przemieszczeń siła wrywająca prawie się nie zmienia. Można więc przyjąć, że łącznik pracuje tylko gdy przemieszczenia nie przekroczą około 4 cm.



Rys. 21. Zależność siły wrywającej od parametrów x oraz y w przypadku łącznika o kształcie sinusoidalnym przy odkształceniu wynoszącym 5%

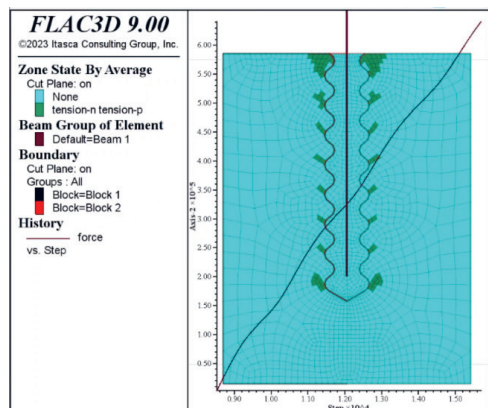


Rys. 22. Zależność maksymalnej siły wrywającej w przypadku łącznika o kształcie sinusoidalnym przy odkształceniach wynoszących 2% oraz 5%

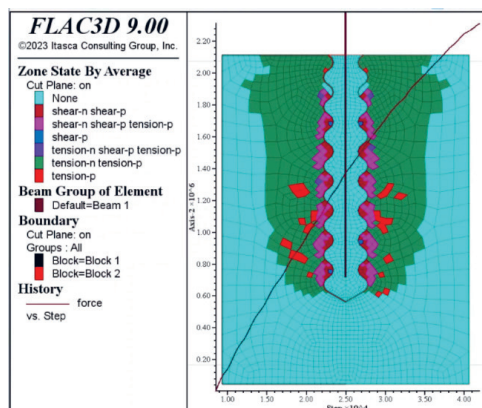


Rys. 23. Zależność siły wrywającej od przemieszczeń w przypadku wybranych kształtów sinusoidalnych – zakres do 5% odkształcenia

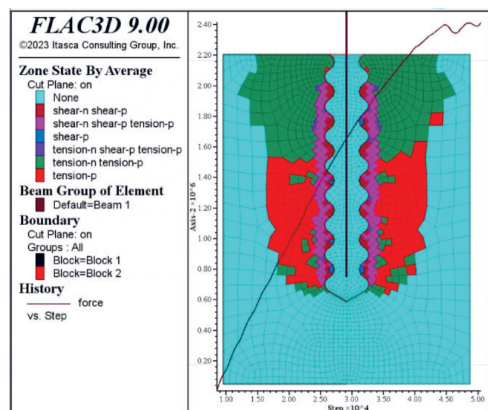
a)



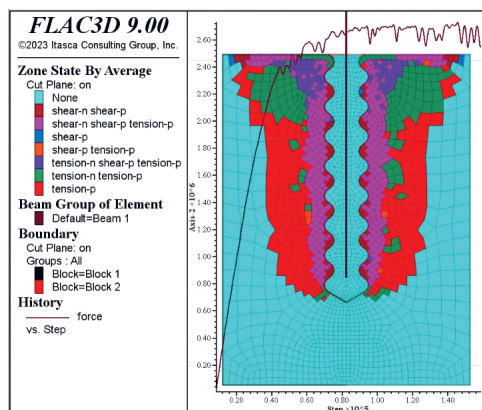
b)



c)



d)



Rys. 24. Strefy uplastycznień (łącznik numer III.0):
a) na początku symulacji; b) w fazie I; c) w fazie II; d) po zakończeniu symulacji

Na rysunku 24 przedstawiono schemat przebiegu zniszczenia w otoczeniu łącznika na przykładzie łącznika numer III.13. Od samego początku łącznik pracuje na całej długości, zaś uplastycznienia pojawiają się na końcówkach „ząbków” (rys. 24a), a następnie postępują wzdłuż „ząbków” (rys. 24b). Warto zauważyć nagromadzenie uplastycznionych stref w górnej części łącznika. Moment przejścia z fazy I do fazy II następuje, gdy strefa cementogruntu w najbliższym sąsiedztwie łącznika przestaje stawiać opór i zostaje całkowicie zniszczona (rys. 24c). Na kolejnym etapie strefa zniszczenia cementogruntu postępuje i nieco się poszerza (rys. 24d).

LITERATURA

- [1] *Szczegółowa mapa geologiczna Polski*, https://bazadata.pgi.gov.pl/data/smgp/arkusze_skany/smgp0970.jpg [dostęp: 2.01.2024].
- [2] Rohde M. i in., *Projekt budowlany: Budowy drogi ekspresowej S1 od węzła „Kosztowy II” w Mysłowicach do węzła „Suchy Potok” w Bielsku – Białej” wg wariantu E*, 2022.
- [3] Stefaniuk D., Menard P.M., Rybak J., *Praktyczne aspekty badania i projektowania kolumn DSM w gruntach organicznych*, [w:] *Duże mosty wieloprzęsłowe: projektowanie, technologie budowy, monitoring: Seminarium Naukowo-Techniczne Wrocławskie Dni Mostowe, Wrocław, 29–30 listopada 2016*, Dolnośląskie Wydawnictwo Edukacyjne, Wrocław 2016, s. 193–202, <https://www.researchgate.net/publication/329973035> [dostęp: 2.01.2024].
- [4] PN-EN 12390-6:2011, *Badania betonu – Część 6: Wytrzymałość na rozciąganie przy rozłupywaniu próbek do badań*.
- [5] PN-EN 12390-3:2019-07, *Badania betonu – Część 3: Wytrzymałość na ściskanie próbek do badań*.
- [6] Pisarczyk S., *Gruntoznawstwo inżynierskie*, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 2012.
- [7] Qian Y., Sun L., Ai L., Zhou Y., Li M.: *Theoretical analysis of the influence of bearing plate position on the bearing performance of soil around the CEP antipull force double pile*, *Buildings*, vol. 13(10), 2023, 2613, <https://doi.org/10.3390/buildings13102613>.
- [8] FLAC3D 9.0 Itasca Software Guide User Manual, <https://docs.itascacg.com/itasca900/flac3d/docproject/source/flac3dhome.html?node1978> [dostęp: 9.05.2024].

Daria Gontarz*

MONITOROWANIE JAKOŚCI POWIETRZA W POLSCE W KONTEKŚCIE KONCEPCJI *SMART CITY*

Zanieczyszczenia powietrza to jeden z największych i najważniejszych problemów, z jakimi borykają się władze miasta w dzisiejszych czasach. Aby polepszyć jakość powietrza, niezbędne jest wdrażanie koncepcji skutecznego zarządzania miastem zgodnie z ideą *smart city*. Jest to koncepcja urbanistyczna, która przyczynia się do polepszenia jakości życia w przestrzeni miejskiej dzięki zastosowaniu nowoczesnych rozwiązań urbanistycznych i technologicznych. W pracy przedstawiono ideę inteligentnego miasta oraz wskazano, jakie istotne czynniki są potrzebne do analizowania dynamicznie zmieniających się warunków i reagowania na zmiany w czasie rzeczywistym. Ponadto w pracy wymieniono przykłady polskich miast spełniających warunki *smart city* oraz zaprezentowano wytyczne dla Polski i perspektywy rozwoju tej koncepcji. Istotnym wynikiem wykonanej analizy problemu jest odpowiedzenie na pytanie, w jaki sposób inteligentne miasta wpływają na poprawę życia mieszkańców oraz jak zmieni się jakość powietrza w dużych aglomeracjach miejskich na przestrzeni najbliższych lat.

MONITORING AIR QUALITY IN POLAND IN THE CONTEXT OF THE SMART CITY CONCEPT

Air pollution is one of the biggest and most important problems faced by city authorities today. To improve air quality, one of the main priorities is to introduce the concept of effective city management according to the smart city idea. It is an urban concept that contributes to improving the quality of life in urban space by using modern urban and technological solutions. The work presents the idea of a smart city and what important factors are needed to analyze and react in real time to dynamic events. Moreover, the work lists in detail examples of Polish cities that meet the conditions of smart city and presents guidelines and prospects for the development of this concept for Poland. An important conclusion from the analysis of the problem is to answer the question how smart cities improve the lives of residents and how the air quality will change in large urban agglomerations in the coming years.

* AGH Akademia Górniczo-Hutnicza, Wydział Zarządzania, Koło Naukowe „Menadżer Produkcji”.

1. WPROWADZENIE I CELE BADAWCZE

W obliczu rosnących problemów związanych z zanieczyszczeniem powietrza miasta na całym świecie stają przed nieuniknionym wyzwaniem: jak skutecznie monitorować jakość powietrza i zarządzać nią w sposób zrównoważony i przyjazny dla mieszkańców? W Polsce, gdzie problem smogu staje się coraz bardziej palący, zwłaszcza w okresach jesienno-zimowych, potrzeba innowacyjnych rozwiązań jest większa niż kiedykolwiek. Niniejszy artykuł ma na celu zbadanie, jak integracja technologii *smart city* może przyczynić się do poprawy monitorowania jakości powietrza w polskich miastach, a tym samym stworzenia zdrowszego i bardziej zrównoważonego środowiska miejskiego.

Motyacją do napisania tej pracy było rosnące zapotrzebowanie na efektywne i innowacyjne metody monitorowania środowiska, które mogą oferować skuteczne rozwiązanie problemów zdrowotnych i ekologicznych wywołanych zanieczyszczeniem powietrza. Wydaje się, że w erze cyfryzacji i rosnącej urbanizacji technologie *smart city* mogą być efektywnym sposobem osiągnięcia tych celów, ponieważ dostarczają narzędzi nie tylko do precyzyjnego monitorowania stanu powietrza, ale również do angażowania społeczności lokalnych i promowania działań na rzecz jego poprawy.

2. KONCEPCJA SMART CITY

Wiele miast zmaga się z problemami, które mają duży wpływ na stan zdrowia ludzi przebywających w danej aglomeracji. Są to między innymi zanieczyszczenia powietrza, niewielka ilość terenów zielonych, bezrobocie i często powiązane z tym akty wandalizmu. Koncepcja *smart city* nie ma jednej składnej definicji. Idea tak zwanego inteligentnego miasta (*smart city*) może być opisana jako koncepcja urbanistyczna mająca na celu poprawienie jakości życia mieszkańców i stanu środowiska przez analizę uwarunkowań wewnętrznych i zewnętrznych oraz dostosowanie się do nich za pomocą innowacyjnych i kreatywnych przedsięwzięć [1].

Koncepcja *smart city* obejmuje wiele różnych aspektów. Są to między innymi [2]:

- inteligentna gospodarka (*smart economy*) – efektywna gospodarka, która wykorzystuje najnowsze technologie; ma na celu wprowadzenie innowacyjnych usług i produktów, a także promuje budowanie sieci współpracy na poziomie lokalnym i międzynarodowym;
- inteligentna mobilność (*smart mobility*) – nowoczesne sposoby podróżowania i logistyka, które wykorzystują inteligentne technologie do zintegrowania różnych środków transportu, aby usprawnić przepływ ludzi i towarów;
- inteligentne środowisko (*smart environment*) – wysokiej jakości zasoby społeczne;
- inteligentne sprawowanie władzy (*smart governance*) – położenie nacisku na zaangażowanie społeczności w podejmowanie decyzji oraz wysoką jakość i łatwy dostęp do usług publicznych;
- inteligentne warunki życia (*smart living*) – wyższy standard życia, który obejmuje bezpieczne i zdrowe warunki życia w mieście oferującym bogactwo możliwości kulturowych i finansowych.

3. SZKODLIWE SUBSTANCJE W POWIETRZU

Obecnie w powietrzu występuje wiele szkodliwych substancji. Są one emitowane głównie przez transport, przemysł energetyczny i spalanie paliw. Groźne są gazy takie jak dwutlenek azotu (NO_2), tlenek węgla (CO), dwutlenek siarki (SO_2), tlenek azotu(III) (NO), ozon (O_3). Są one składnikami smogu i stanowią poważne zagrożenie dla ludzkiego zdrowia, w szczególności przy dłuższym kontakcie z daną substancją.

Inną niebezpieczną grupą są pyły zawieszone. Powstają one między innymi w wyniku erupcji wulkanów lub pożarów lasów, niemniej jednak większą ich część produkuje człowiek. Do tej kategorii zalicza się pył $\text{PM}_{2,5}$. Jest to aerozol atmosferyczny uznawany za najgroźniejszą dla zdrowia człowieka substancję, jaka znajduje się w powietrzu. Jego średnica nie przekracza $2,5\ \mu\text{m}$, dlatego jest w stanie przedostać się do krwioobiegu wraz z wdychanym powietrzem. Jest on powodem występowania takich chorób jak zaburzenia rytmu serca, miażdżyca, zapalenie naczyń krwionośnych lub nowotwory płuc, krtani i gardła. Pył $\text{PM}_{2,5}$ jest tak niebezpieczny, że WHO (World Health Organization) ustaliło normę średniego dobowego stężenia tego pyłu, która wynosi $25\ \mu\text{g}/\text{m}^3$ (roczna norma to $10\ \mu\text{g}/\text{m}^3$). Po przekroczeniu normy ogłaszany jest alarm.

Drugim niebezpiecznym pyłem zawieszonym jest pył PM_{10} . Jest to zawiesina rakotwórczych metali niezależnych (takich jak benzopireny, dioksyny, furany) o średnicy nieprzekraczającej $10\ \mu\text{m}$. Odpowiada on za gwałtowne zapalenie oskrzeli, ataki kaszlu czy pogorszenie się stanu osób z astmą. W tym przypadku WHO również wprowadziło normę dziennego średniego stężenia pyłu w powietrzu, która wynosi $50\ \mu\text{g}/\text{m}^3$ (roczna to $20\ \mu\text{g}/\text{m}^3$), jednak informację o przekroczonej normie podaje się dopiero wtedy, kiedy średnie dobowe stężenie osiągnie $200\ \mu\text{g}/\text{m}^3$ [3].

Wymienione zagrożenia pokazują, jak ważne jest monitorowanie i próba poprawy jakości powietrza.

4. SPOSOBY MONITOROWANIA JAKOŚCI POWIETRZA

Istnieje kilka sposobów monitorowania stanu powietrza. Jednym z najbardziej skutecznych jest zbieranie i magazynowanie danych za pomocą stacji automatyczno-manualnych. Regionalne wydziały monitoringu środowiska (RWMS) opracowały wojewódzkie programy działań w tym zakresie. Stacje pomiarowe rozmieszczono w wybranych częściach województw. Kryteria lokalizacji zostały określone w rozporządzeniu Ministerstwa Klimatu i Środowiska w sprawie dokonywania oceny poziomów substancji w powietrzu [4]. O lokalizacji stacji pomiarowych decyduje Główny Inspektor Ochrony Środowiska (GIOŚ). Zgodnie z art. 88 ust. 2 ustawy Prawo ochrony środowiska [5] GIOŚ przeprowadza wieloletnie oceny jakości powietrza w ramach Państwowego Monitoringu Środowiska (PMŚ). Dane są magazynowane w krajowej bazie danych JPOAT2,0 Głównego Inspektora Ochrony Środowiska. Są one ogólnodostępne i można je wyszukiwać za pomocą portalu Jakość Powietrza [6].

Inną metodą jest stosowanie dronów (rys. 1) z wbudowanymi czujnikami służącymi do pomiaru stężeń zanieczyszczeń powietrza. Drony są wykorzystywane do celów badawczych, kontrolnych i pomiarów interwencyjnych. Umożliwiają uzyskanie bardziej zróżnicowanych danych na temat stanu powietrza w różnych warunkach i obszarach miasta.



Rys. 1. AirDron od SoftBlue SA

Źródło: [7]

Kolejnym przykładowym sposobem monitorowania jakości powietrza jest sieć czujników IoT. System jest zasilany z baterii, które zapewniają mu autonomiczne funkcjonowanie przez ponad rok. Co godzinę system wybudza się i dokonuje cosekundowych pomiarów cząstkowych, następnie uśredniając ich wynik. Urządzenie jest stosowane do pomiaru stężenia pyłów PM_{2,5}, PM₁₀ oraz temperatury powietrza. Zebrane dane są przesyłane z czujników do centralnego systemu przez radiową sieć IoT LoVo – LoRaWAN. Po przekroczeniu normy system wysyła do zapisanych użytkowników wiadomości SMS. Informuje on o możliwym niebezpieczeństwie związanym z przebywaniem na wolnym powietrzu, co jest idealną opcją dla osób, którzy nie sprawdzają regularnie stanu powietrza [8].

5. PRZYKŁADOWE DZIAŁANIA SŁUŻĄCE POPRAWIE JAKOŚCI POWIETRZA W KONCEPCJI *SMART CITY*

Inteligentny system transportu (ITS) to system informacyjny i komunikujący. Służy między innymi do zredukowania liczby zakorkowanych miejsc, co zapewnia większy komfort i bezpieczeństwo pasażerom i uczestnikom ruchu ulicznego. Dzięki niemu zmniejsza się również ilość spalin produkowanych przez pojazdy. ITS wykorzystuje inteligentne technologie transportowe, takie jak systemy sterowania sygnalizacją świetlną, tablice zmiennej treści (rys. 2), automatyczne wykrywanie incydentów czy aplikacje, które przetwarzają i magazynują potrzebne dane. Dzięki temu zapewnia bezpieczniejsze i bardziej skoordynowane korzystanie z sieci transportowych [9].



Rys. 2. Przykładowa tablica zmiennej treści inteligentnego systemu

Źródło: [10]

Wprowadzenie stref niskoemisyjnych jest kolejnym dużym krokiem do poprawy jakości powietrza w polskich miastach. Strefa czystego powietrza (SCT) jest wydzielonym sektorem obejmującym drogi, po których mogą poruszać się jedynie pojazdy spełniające normy emisji spalin. Wjazd do strefy czystego powietrza będą miały między innymi samochody elektryczne, napędzane wodorem lub gazem ziemnym. Od połowy 2024 roku w Warszawie została wprowadzona właśnie taka strefa [11], w związku z czym samochody niespełniające wymaganych norm (przykładowo wyposażone w silnik Diesla bądź benzynowy) nie będą mogły wjeżdżać na teren strefy. Ciągłe rozwijająca się infrastruktura i usługi są częścią transformacji transportu miejskiego. Stawianie na rowery miejskie, hulajnogi elektryczne (rys. 3) i inne formy ekologicznej mobilności ma na celu zmniejszenie zależności od indywidualnych pojazdów silnikowych. Aktywne promowanie bardziej ekologicznych środków transportu zwiększa ciekawość i świadomość ludzi. Jest to kluczowe dla walki z zanieczyszczeniami powietrza.



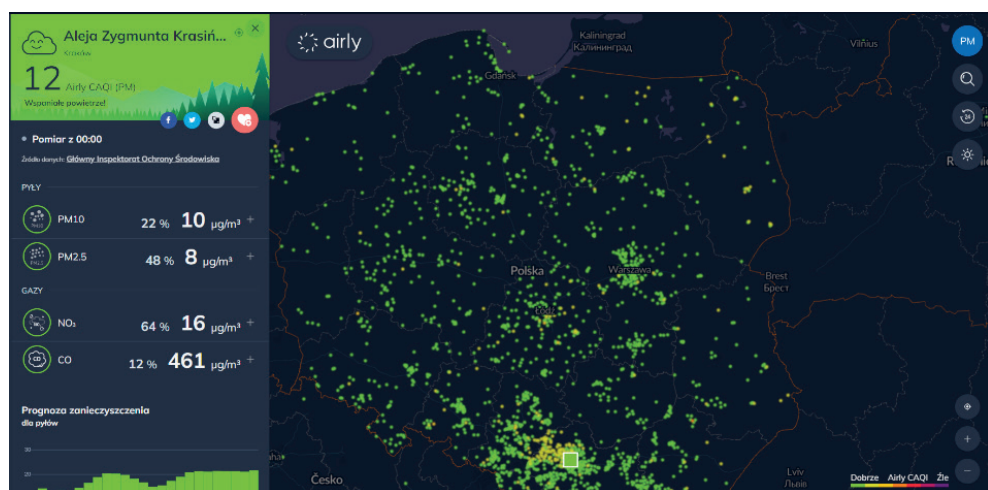
Rys. 3. Hulajnogi elektryczne w Poznaniu

Źródło: [12]

Dzięki łatwo dostępnym aplikacjom i platformom internetowym mieszkańcy oraz turyści są w stanie bezproblemowo sprawdzić dostępność i położenie najbliższej hulajnogi lub roweru. Sprawia to, że ludzie chętniej korzystają z wyżej wymienionych usług. Wymiana samochodu na rower jest bardzo korzystna dla polepszenia się jakości powietrza na terenach polskich miast. Redukcja liczby samochodów na drogach przyczynia się do zmniejszenia korków ulicznych, a co za tym idzie – ilości wydzielanych spalin. Dlatego ważne jest to, aby miasta były odpowiednio wyposażone w trasy rowerowe i parkingi dla rowerów [13].

6. SKALA ZANIECZYSZCZEŃ POWIETRZA W POLSCE

Dzięki nowoczesnym programom i technologiom jesteśmy w stanie na bieżąco monitorować stan jakości powietrza w wybranych rejonach Polski. Przykładem jest strona Airly, która na bieżąco udostępnia informacje pobrane z około 40 000 punktów pomiarowych (rys. 4).

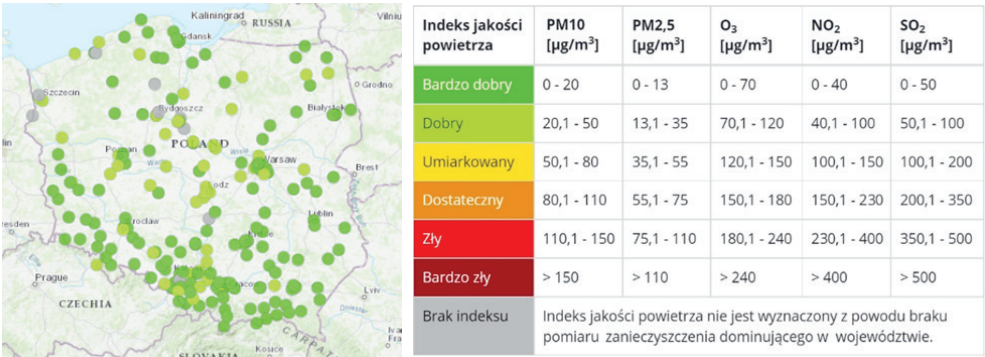


Rys. 4. Stan jakości powietrza w Krakowie na 20.02.2024 r.

Źródło: [14]

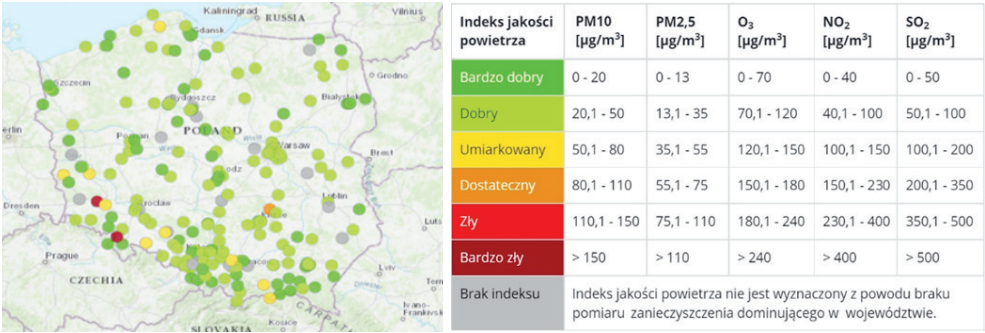
Dzięki informacjom z automatycznych stacji pomiarowych jesteśmy w stanie obserwować, jak zmienia się jakość powietrza w ciągu dnia. Porównując dane z godziny 6.00 oraz z godziny 23.00 (rys. 5, 6), widzimy, że jakość powietrza nawet w ciągu niecałej doby może się znacząco zmienić.

Używając tych samych technologii, możemy również sprawdzić, jak zmieniła się jakość powietrza w Polsce na przestrzeni lat. Analizując dane za 2010 rok (rys. 7), można zauważyć jedynie kilka miast, które charakteryzowały się dobrą jakością powietrza. Po siedmiu latach, czyli w 2017 roku (rys. 8), strefa z dobrą jakością powietrza powiększyła się o trzy województwa, a w 2022 roku (rys. 9) ponad 50% powierzchni Polski zaliczało się do tej grupy.



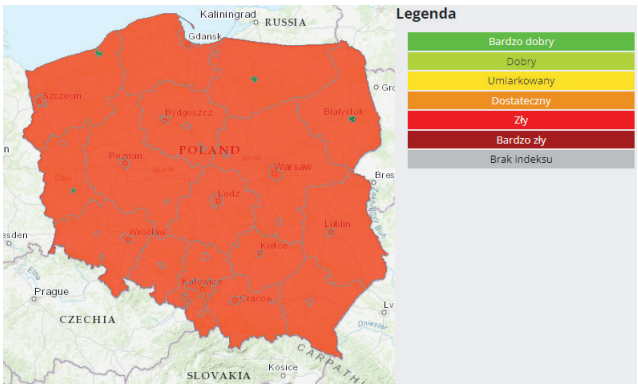
Rys. 5. Stan jakości powietrza w Polsce na 21.02.2024 r., godz. 6.00

Źródło: opracowanie własne na podstawie [15]



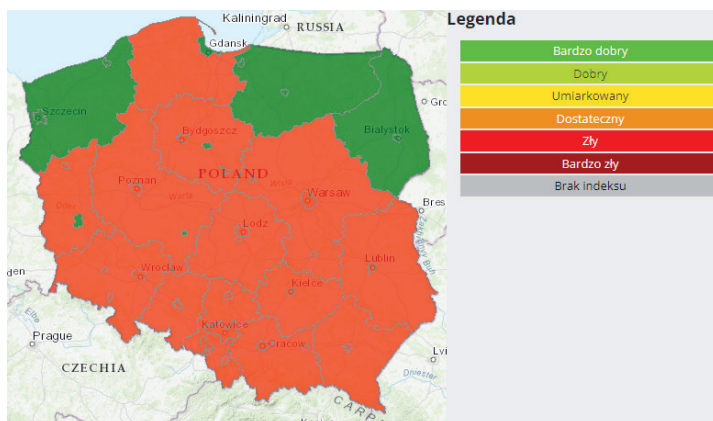
Rys. 6. Stan jakości powietrza w Polsce na 21.02.2024 r., godz. 23.00

Źródło: opracowanie własne na podstawie [15]



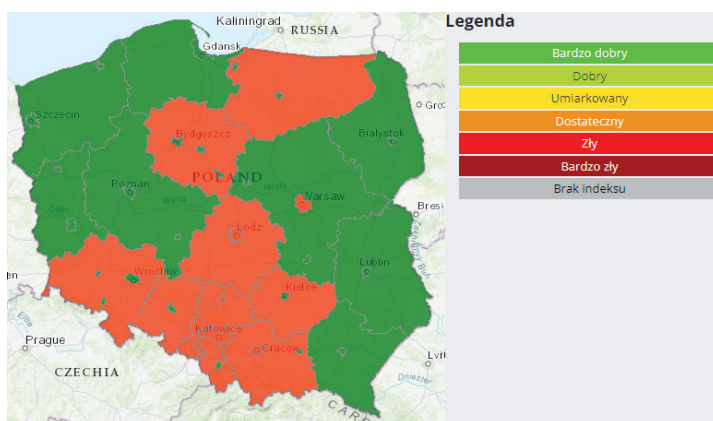
Rys. 7. Stan jakości powietrza w Polsce na 2010 rok

Źródło: opracowanie własne na podstawie [15]



Rys. 8. Stan jakości powietrza w Polsce na 2017 rok

Źródło: opracowanie własne na podstawie [15]



Rys. 9. Stan jakości powietrza w Polsce na 2022 rok

Źródło: opracowanie własne na podstawie [15]

PODSUMOWANIE

W artykule została omówiona koncepcja *smart city*. Zwrócono uwagę na jej kluczowe aspekty, takie jak inteligentna gospodarka, mobilność i zarządzanie, które mają na celu poprawę warunków życia mieszkańców i turystów. Pokazano, że zanieczyszczenie powietrza jest kluczowym problemem dla władz miejskich oraz omówiono główne rodzaje zanieczyszczeń, w tym pył PM₁₀ i PM_{2,5}, podkreślając ich negatywny wpływ na zdrowie ludzi. Przedstawiono metody monitorowania jakości powietrza przy użyciu między innymi stacji automatyczno-manualnych i dronów z wbudowanymi czujnikami, zaprezentowano działania mające poprawić jakość powietrza oraz pokazano, jak zmienił się stan jakości powietrza w Polsce na przestrzeni lat.

Podziękowania

Artykuł powstał na podstawie wygłoszonego na 64. Barbórkowej Konferencji Studenckich Kół Naukowych AGH referatu, który zajął drugie miejsce w sekcji XVI. Inżynieria produkcji i jakości. Serdeczne wyrazy wdzięczności kieruję w stronę Pana dr. inż. Mariusza Niekurza-ka, opiekuna Koła Naukowego „Menadżer Produkcji”. Dziękuję za pomoc przy pracy oraz wsparcie merytoryczne.

LITERATURA

- [1] Ryba M., *Czym jest koncepcja smart city, a zatem dlaczego powinniśmy je nazywać miastem sprytnym*, Prace Naukowe Uniwersytetu Ekonomicznego we Wrocławiu, nr 467, 2017, s. 84–90, <https://www.doi.org/10.15611/pn.2017.467.07>.
- [2] Bitkowska A., Łabędzki K., *Koncepcja inteligentnego miasta – definicje, założenia, obszary*, Marketing i Rynek / Journal of Marketing and Market Studies, t. 28, nr 2/2021, 2021, s. 3–11, <https://doi.org/10.33226/1231-7853.2021.2.1>.
- [3] Tomala M., *Monitorowanie jakości powietrza w Polsce w świetle koncepcji smart city*, Środkowoeuropejskie Studia Polityczne, nr 1, 2023, s. 45–70, <https://doi.org/10.14746/ssp.2023.1.3>.
- [4] *Rozporządzenie Ministra Klimatu i Środowiska z dnia 11 grudnia 2020 r. w sprawie dokonywania oceny poziomów substancji w powietrzu*, Dz.U. 2020 poz. 2279.
- [5] *Ustawa z dnia 27 kwietnia 2001 r. – Prawo ochrony środowiska*, Dz.U. 2001 r. nr 62, poz. 627.
- [6] Główny Inspektorat Ochrony Środowiska, *Portal Jakość Powietrza GIOŚ*, <https://powietrze.gios.gov.pl/pjp/home> [dostęp: 18.02.2024].
- [7] SoftBlue SA, *AirDron od SoftBlue SA*, <https://softblue.pl/produkty/eco-solutions/airdron/> [dostęp: 18.02.2024].
- [8] LoVo, *System do monitorowania jakości powietrza*, <https://www.lovo.pl/iot/system-do-monitorowania-jakosci-powietrza/> [dostęp: 18.02.2024].
- [9] Wikipedia, *Inteligentny system transportowy*, https://pl.wikipedia.org/wiki/Inteligentny_system_transportowy [dostęp: 18.02.2024].
- [10] Wikipedia, *Tablica zmiennej treści inteligentnego systemu przy ul. Gdańskiej w Bydgoszczy*, https://pl.wikipedia.org/wiki/Inteligentny_system_transportowy#/media/Plik:Bdg_ITS_9_4-2015.jpg [dostęp: 18.02.2024].
- [11] autoDNA blog, *Strefa czystego transportu – w jakich miastach Polski? Od kiedy?*, 2023, <https://www.autodna.pl/blog/strefa-czystego-transportu/> [dostęp: 19.02.2024].
- [12] RB/Urząd Miasta Poznania, *Hulajnogi elektryczne w Poznaniu*, 2018, <https://zdm.poznan.pl/web/aktualnosci/view/id/hulajnogi-elektryczne-w-poznaniu> [dostęp: 19.02.2024].
- [13] KROSSTECH, *Smart City a przyszłość transportu – rowerownie, hulajnogi elektryczne*, 2023, <https://www.stojaknarower.pl/blog/smart-city-a-przyszlosc-transportu-rowerownie-hulajnogi-elektryczne> [dostęp: 19.02.2024].
- [14] Airly, *Stan jakości powietrza dla Krakowa na dzień 20.02.2024 r.*, 2024, <https://airly.org/map/pl/#50.057678,19.926189,i17> [dostęp: 20.02.2024].
- [15] Główny Inspektorat Ochrony Środowiska, <https://powietrze.gios.gov.pl/pjp/current> [dostęp: 21.02.2024].

Aleksandra Kornaś*

WYMAGANIA SYSTEMÓW WENTYLACJI W LABORATORIACH CHEMICZNYCH I BIOLOGICZNYCH

Wentylacja w każdym z typów laboratoriów pełni kluczową rolę. Jej zadaniem jest zapewnienie odpowiednich, bezpiecznych warunków dla ludzi w nich przebywających. Odpowiada także za utrzymanie w pomieszczeniu warunków niezbędnych do prawidłowego przeprowadzenia procesów chemicznych lub doświadczeń biologicznych. Porównując dwa typy laboratoriów, można dostrzec sporo różnic, ale też sporo podobieństw. Ze względu na specyfikę poszczególnych typów laboratoriów wytyczne projektowe w tym zakresie są bardzo ograniczone, mają raczej charakter ogólny. W artykule przedstawione zostały najważniejsze kwestie dotyczące uwarunkowań projektowania instalacji wentylacji w laboratorium chemicznym oraz w laboratorium biologicznym.

REQUIREMENTS OF VENTILATION SYSTEMS IN CHEMICAL AND BIOLOGICAL LABORATORIES

Ventilation in any type of laboratory plays a key role. Its purpose is to ensure appropriate, safe conditions for the people in them. It is also responsible for maintaining the appropriate conditions in the room, which are necessary for the proper performance of chemical processes or biological experiments. When considering the two types of laboratories, one can see a lot of differences but also a lot of similarities. Due to the peculiarities of the different types of laboratories, design guidelines in this area are very limited, being rather general in nature. The paper presents the most important issues concerning the considerations for designing ventilation systems in a chemical laboratory and in a biological laboratory.

1. WPROWADZENIE

W dzisiejszych czasach rozwój technologii i postęp naukowy wywierają znaczący wpływ na bezpieczeństwo oraz metody pracy stosowane w laboratoriach, szczególnie w obszarze chemii i biologii. W związku z tym ważne jest spełnienie specjalnych wymagań dotyczących systemów

* AGH Akademia Górniczo-Hutnicza, Wydział Inżynierii Łądowej i Gospodarki Zasobami, Koło Naukowe „Kliwent”.

wentylacji – zarówno ze względu na zdrowie i życie pracowników, którzy przebywają w laboratoriach, jak i ze względu na prowadzone w nich procesy badawcze. Aby przebiegały one prawidłowo, w laboratorium muszą panować warunki, które pozwolą na uzyskanie powtarzalnych wyników badań i dodatkowo zabezpieczą przed skażeniem materiału badawczego.

W każdej dziedzinie przemysłu, w instytucjach badawczych, placówkach naukowych, pracowniach chemicznych czy też w szkolnictwie niezbędne są laboratoria. Są to wyznaczone specjalne pomieszczenia bądź niekiedy całe budynki, w których przeprowadza się różnego typu badania, syntezy, analizy oraz dokonuje się eksperymentów naukowych. W tych miejscach dochodzi do emitowania do powietrza szkodliwych gazów, pary czy też pyłów, również tych promieniotwórczych i niebezpiecznych dla zdrowia. Przedostawanie się substancji chemicznych do organizmu może odbywać się poprzez układ oddechowy (drogą inhalacyjną), przewód pokarmowy oraz przez skórę. Toksyny najczęściej przedostają się do organizmu drogą oddechową. Jeśli cząsteczki stałe substancji chemicznych dostaną się do płuc, uszkadzają pęcherzyki płucne, a następnie z płuc mogą być wchłaniane przez krew i z pominięciem mechanizmów obronnych mogą się rozprzestrzenić w całym organizmie. W zapewnieniu wysokich standardów bezpieczeństwa i efektywności kluczową rolę odgrywają instalacje wentylacyjne. Mają one za zadanie zapewnić prawidłową cyrkulację powietrza oraz usuwać uwalniane do niego niebezpieczne substancje chemiczne czy biologiczne. Ważne jest także dostarczanie do laboratorium powietrza o zadanej temperaturze oraz utrzymywanie jej w czasie pracy laboratorium.

W związku z różną specyfikacją pracy laboratorium biologicznego i chemicznego obowiązują zróżnicowane wymagania dotyczące instalacji wentylacji w obu tych typach laboratoriów. Nierzadko opracowanie odpowiedniej oraz efektywnej instalacji wentylacji jest procesem, który wymaga zebrania bardzo dużej ilości informacji istotnych przy doborze optymalnego rozwiązania technicznego oraz dużego doświadczenia i zaangażowania osoby wykonującej projekt instalacji wentylacyjnej w takim pomieszczeniu bądź budynku. Najważniejszymi informacjami potrzebnymi, aby wybrać najlepsze rozwiązanie, są m.in.:

- kubatura oraz powierzchnia laboratorium, najczęściej z rzutem architektonicznym oraz usytuowaniem mebli bądź urządzeń technologicznych;
- liczba osób przebywających w laboratorium;
- zyski ciepła występujące w pomieszczeniu;
- dopuszczalny poziom hałasu instalacji;
- wymagane parametry środowiska wewnętrznego, np. temperatura, wilgotność, wymagania dotyczące klasy czystości pomieszczeń, konieczność stosowania filtracji.

W takich miejscach najbezpieczniejszym rozwiązaniem jest zastosowanie wentylacji mechanicznej, szczególnie w przypadku gdy w danym laboratorium są wymagane nieotwieralne okna.

Zastosowanie instalacji wentylacji w budynkach laboratoryjnych ma szczególne znaczenie ze względu na zdrowie i życie ludzi w nich przebywających oraz na laboratoryjne procesy technologiczne bądź prowadzone badania. Jej zadaniem jest przede wszystkim wyprowadzenie z pomieszczenia emitowanych w nim zanieczyszczeń odbywające się za pośrednictwem instalacji wywiewnej.

Celem niniejszego artykułu jest wskazanie i omówienie podstawowych cech laboratoriów biologicznych oraz chemicznych. Na podstawie analizy porównawczej określono różnice i podobieństwa występujące przy projektowaniu i późniejszym wykonaniu instalacji wentylacji w takich pomieszczeniach. Współczesna nauka i rozwój technologiczny skutkują coraz większym zapotrzebowaniem na nowoczesne i bezpieczne laboratoria, w których prowadzone są badania chemiczne oraz biologiczne. W związku z tym odpowiednie zaprojektowanie, zainstalowanie i utrzymanie systemów wentylacji staje się kluczowym elementem zapewnienia bezpiecznych i efektywnych warunków pracy w takich laboratoriach. Dogłębne zrozumienie różnic i podobieństw w wymaganiach dotyczących instalacji wentylacji w tych dwóch typach laboratoriów pozwoli na wypracowanie rekomendacji dotyczących projektowania, instalacji oraz eksploatacji systemów wentylacyjnych, które uwzględnią specyfikę każdego z tych środowisk. Dobrze dobrane oraz zaprojektowane urządzenia mogą w znacznym stopniu przyczynić się do oszczędności energetycznych. Zapewnienie optymalnych warunków pracy dla personelu oraz skuteczna ochrona środowiska zostaną osiągnięte dzięki wdrażaniu najlepszych praktyk w zakresie instalacji wentylacji w laboratoriach chemicznych i biologicznych.

Artykuł ma na celu wzbogacenie wiedzy na temat projektowania, instalacji oraz eksploatacji systemów wentylacyjnych w laboratoriach. Ostatecznie ma to przyczynić się do rozwoju bardziej efektywnych, bezpiecznych i zrównoważonych laboratoriów, które spełnią najwyższe standardy bezpieczeństwa oraz wydajności badawczej. Temat został wybrany ze względu na bardzo ubogą literaturę w tym zakresie.

2. UWARUNKOWANIA STOSOWANIA SYSTEMÓW WENTYLACJI W LABORATORIACH

Zastosowanie instalacji wentylacji w laboratoriach różnych typów jest konieczne ze względu na charakter przeprowadzanych prac oraz ze względu na obecność niebezpiecznych, toksycznych lub promieniotwórczych substancji. W odniesieniu do każdego typu laboratorium istnieją odrębne wymagania, dzięki którym praca w nich będzie bezpieczna. Laboratorium najczęściej kojarzy się z miejscem, gdzie prowadzi się eksperymenty chemiczne czy biologiczne, natomiast istnieją laboratoria o charakterze mniej niebezpiecznym i o innym przeznaczeniu.

Laboratoria mogą zostać podzielone na następujące grupy [1]:

- przemysłowe,
- badawczo-pomiarowe,
- szkoleniowe/dydaktyczne.

Laboratoria przemysłowe. Są to specjalnie przystosowane przestrzenie zajmujące zarówno małe pomieszczenia, jak i duże hale, w których przeprowadza się badania, testy i analizy. Charakterystyczne dla takiej grupy laboratoriów jest wyposażenie dostosowane do potrzeb danego sektora przemysłu oraz wymagań konkretnych badań i procesów produkcyjnych. Wyposażenie to obejmuje zróżnicowane, niezbędne urządzenia, narzędzia i aparaturę laboratoryjną.

W zależności od potrzeb i rodzaju prowadzonych działań może to być m.in. aparatura pomiarowa i kontrolna (spektrofotometry, chromatografy, analizatory składu chemicznego czy mikroskopy), urządzenia przemysłowe (reaktory chemiczne, autoklawy, piece grzewcze, sprzęt do obróbki materiałów) oraz systemy automatyzacji i kontroli procesów produkcyjnych (systemy sterowania produkcją oraz monitorowanie parametrów technicznych). Ten typ laboratoriów jest charakterystyczny dla pracowni badawczo-rozwojowych, pracowni produkcyjnych oraz pracowni kontroli jakości. W tych pierwszych odbywają się eksperymenty i badania oraz opracowuje się nowe produkty, technologie czy procesy produkcyjne. Mogą tu być przeprowadzane badania chemiczne, biologiczne, fizyczne czy inżynierskie, np. testy określające własności aerodynamiczne samolotów lub pojazdów kosmicznych. W pracowniach produkcyjnych wytwarza się produkty przemysłowe na większą skalę, dokonuje kontroli jakości, optymalizacji procesów produkcyjnych oraz monitorowania parametrów technologicznych. W pracowniach kontroli jakości przeprowadza się natomiast testy, analizy i kontrole jakości surowców, półproduktów oraz gotowych produktów w celu zapewnienia ich zgodności ze standardami i normami jakościowymi. Laboratoria przemysłowe muszą spełniać określone normy oraz być zgodne z przepisami dotyczącymi bezpieczeństwa, higieny pracy oraz ochrony środowiska. Pozwalają one na rozwój nowych produktów oraz zapewnienie wysokiej jakości i bezpieczeństwa produktów przemysłowych.

Laboratoria badawczo-pomiarowe. Zajmują zazwyczaj niewielkie pomieszczenie wyposażone w specjalistyczny sprzęt, ale oprócz tego w ich skład mogą wchodzić inne, dodatkowe pomieszczenia różniące się od samego pomieszczenia laboratorium wymaganiami dotyczącymi jakości powietrza, w tym jego parametrów fizycznych. Infrastruktura laboratoriów badawczo-pomiarowych musi być przystosowana do celów prowadzenia precyzyjnych badań naukowych oraz pomiarów o wysokiej dokładności. W jej skład mogą wchodzić m.in. zaawansowane urządzenia pomiarowe, specjalistyczne przyrządy badawcze, systemy automatyzacji i sterowania oraz inna infrastruktura laboratoryjna umożliwiająca zapewnienie odpowiednich warunków pracy oraz przeprowadzanie różnorodnych eksperymentów. W tego typu laboratoriach dokonuje się pomiarów wielkości fizycznych oraz regulacji przyrządów pomiarowych według ustalonych procedur i w ustalonych warunkach. Bardzo precyzyjna i zaawansowana infrastruktura laboratorium badawczo-pomiarowego daje bardzo duże możliwości walidacji i udoskonalania procedur pomiarowych. Celem tego typu laboratorium jest zdobycie wiedzy, rozwiązywanie problemów naukowych oraz rozwój nowych technologii w różnorodnych dziedzinach nauki, np. w chemii, fizyce, biologii, inżynierii, materiałoznawstwie czy medycynie.

Laboratoria szkoleniowe/dydaktyczne. Są to specjalne przestrzenie przeznaczone do przeprowadzania w praktyczny sposób zajęć, ćwiczeń i szkoleń dla studentów, uczniów, pracowników oraz innych grup społecznych zainteresowanych zdobyciem praktycznych umiejętności w zakresie danej dziedziny nauki i technologii. Mają specyficzne cechy i funkcje, których celem jest promowanie efektywnego uczenia się poprzez doświadczanie. Wyposażenie oraz infrastruktura laboratoriów szkoleniowych muszą być przystosowane do prowadzenia szkoleń i zajęć praktycznych. W zależności od konkretnej dziedziny nauki lub techniki laboratoria te mogą być wyposażone w różnorodne urządzenia, narzędzia i sprzęt laboratoryjny, m.in. stanowiska laboratoryjne (np. do mikroskopii, do analiz chemicznych czy eksperymentów fizycznych), komputery i urządzenia multimedialne (wyposażone w przystosowane

oprogramowanie edukacyjne), aparaturę i sprzęt laboratoryjny (przyrządy pomiarowe, mikroskopy, wyposażenie chemiczne czy sprzęt fizyczny), symulatory i modele (potrzebne do symulowania realistycznych warunków i procesów, które nie mogą być prowadzone w pełni bezpieczny lub efektywny sposób w warunkach rzeczywistych na prawdziwych obiektach lub substancjach) oraz materiały edukacyjne (pomoce dydaktyczne, modele trójwymiarowe czy materiały instruktażowe). Laboratoria te spełniają szereg wymagań dotyczących zachowania wysokiego poziomu bezpieczeństwa i higienicznych warunków pracy oraz nauki. Pracownicy przechodzą odpowiednie przeszkolenie w zakresie bezpiecznego użytkowania urządzeń i sprzętu oraz prowadzenia zajęć praktycznych.

Uwarunkowania, które dotyczą stosowania systemów wentylacji w laboratoriach, obejmują wiele czynników, a ich celem jest zapewnienie bezpiecznych i higienicznych warunków pracy.

3. UWARUNKOWANIA STOSOWANIA WENTYLACJI W LABORATORIUM CHEMICZNYM

Charakterystyczne dla laboratorium chemicznego jest utrzymanie w nim podciśnienia, czyli spełnienie warunku, aby do pomieszczenia był doprowadzany mniejszy strumień powietrza niż strumień z niego odprowadzany. Jest to szczególnie istotne dlatego, że powietrze, które jest zanieczyszczone różnymi toksycznymi substancjami, nie może dostać się do innych pomieszczeń, przede wszystkim do tych, które objęte są inną strefą lub innym przeznaczeniem. Dzięki utrzymaniu podciśnienia w laboratorium, w którym unoszą się toksyczne opary, jesteśmy w stanie zapobiec przedostaniu się zanieczyszczonego powietrza na zewnątrz pomieszczenia. W niedużych laboratoriach podciśnienie utrzymuje się na poziomie 10–30 Pa. Standardowa temperatura, która musi być utrzymana w laboratorium chemicznym, wynosi 19–24°C w zależności od aktualnych potrzeb. Warto wspomnieć o krotności wymian powietrza w takim pomieszczeniu: jest to aż 8–10 wymian powietrza na godzinę. Dla porównania w pomieszczeniach biurowych są to zazwyczaj wartości nieprzekraczające 3 wymian na godzinę. Ciekawym przykładem jest laboratorium chemiczne typu *scale-up*. Są to miejsca, w których wytwarza się odczynniki na dużą skalę i procesy przebiegają o wiele szybciej niż w tradycyjnym laboratorium chemicznym.

3.1. WYPOSAŻENIE LABORATORIUM CHEMICZNEGO WSPÓŁPRACUJĄCE Z SYSTEMEM WENTYLACJI

Biorąc pod uwagę specyfikację laboratorium, aby poprawnie przeprowadzać badania w laboratorium, potrzebne jest specjalistyczne wyposażenie. Urządzenia znajdujące się w takim laboratorium to np. komory trzysekcyjne, dygestoria tradycyjne, dygestoria typu *walk-in*, stół laboratoryjny z odciągami miejscowymi, szafy wentylowane na butle oraz szafy wentylowane na odczynniki niebezpieczne. Niektóre urządzenia zasługują na szczególną uwagę, gdyż składają się one z bardzo ciekawych oraz istotnych elementów, a co najważniejsze – są podpięte do systemu wentylacji.

Dygestorium tradycyjne

Najciekawszym z urządzeń jest dygestorium tradycyjne, czyli wyciąg laboratoryjny zapobiegający wydostawaniu się do atmosfery laboratorium szkodliwych substancji (rys. 1). Na schemacie możemy zobaczyć, z czego składa się to urządzenie (rys. 2). Oprócz szafki wentylowanej, szyby ruchomej oraz instalacji wyciągowej jego elementem są także czujniki położenia okna (*sash sensors*) oraz prędkości przepływu powietrza. Poziom otwarcia okna jest ściśle uregulowany przepisami i wynosi 50 cm, przy szerszym otwarciu następuje blokada. W przypadku otwarcia szyby dygestorium następuje spadek ciśnienia w kanale, w efekcie czego współpracujący z nim wentylator wyciągowy zwiększa wydatek w celu utrzymania zadanej wartości ciśnienia. Skutkiem zwiększenia wydatku w wyciągu jest wzrost ciśnienia w pomieszczeniu. W celu utrzymania prawidłowej wartości podciśnienia regulator VAV nawiewny dostosowuje swój wydatek, zapewniając utrzymanie gradacji ciśnień pomiędzy pomieszczeniami. Minimalny wydatek powietrza przy zamkniętym oknie osiąga wartość 170 m³/h, a maksymalny przy maksymalnym stopniu otwarcia wynosi 500 m³/h.

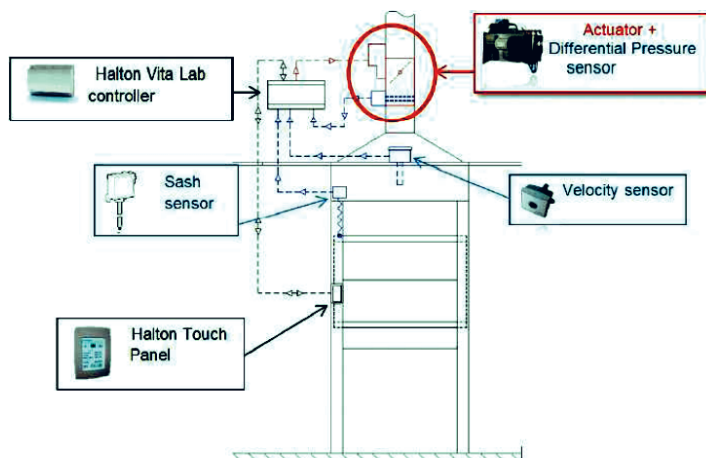


Rys. 1. Dygestorium tradycyjne

Źródło: [2]

Ważnym elementem jest także panel znajdujący się na obudowie dygestorium (rys. 3), który jest połączony z wymienionymi czujnikami i z którego można odczytać, czy chemik może bezpiecznie korzystać z dygestorium. Takie panele stosuje się w każdym dygestorium z osobna. Najważniejsze funkcje, które można włączyć z poziomu panelu, to tryb MAX i ECO. Włączenie trybu MAX spowoduje zwiększenie strumienia powietrza wywiewanego z 500 m³/h na 1000 m³/h, jeśli zdarzy się wypadek lub rozleje się większa ilość substancji. Tryb ECO natomiast spowoduje zminimalizowanie przepływu w celu oszczędności energii.

Chemik może włączyć go po zakończonym dniu pracy. Najważniejszą funkcją tego panelu jest jednak informowanie o nieprawidłowej pracy dygestorium. Jeżeli prędkość powietrza w kanale wywiewnym spadnie poniżej wartości ustalonej i będzie to trwało przez co najmniej 10 s, uruchomi się optyczny oraz akustyczny alarm.



Actuator + Differential Pressure sensor – regulator VAV z PPS z szybkim siłownikiem 2,5s,
chemoodpornym czujnikiem różnicy ciśnień
Halton Vita Lab controller – sterownik elektroniczny
Sash sensor – czujnik potencjometryczny
Velocity sensor – czujnik prędkości powietrza
Halton Touch Panel – dotykowy panel sterujący

Rys. 2. Schemat dygestorium

Źródło: [3]



Rys. 3. Panel obsługujący dygestorium firmy Halton

Dygestorium typu *walk-in*

Dygestorium typu *walk-in* (rys. 4) to komora o większych rozmiarach, obsługiwana przez regulator typu CAV. Oznacza to, że strumień przepływającego powietrza niezależnie od poziomu otwarcia okna dygestorium jest stały. Wydatek w takim dygestorium ma wartość ok. 1500 m³/h. Ten typ dygestorium nie jest przeznaczony do pracy, służy ono do przechowywania substancji będących produktem ubocznym lub odpadów w dużych pojemnikach.



Rys. 4. Dygestorium typu *walk-in*

Źródło: [4]

Szafy wentylowane na odczynniki niebezpieczne

Szafy wentylowane na odczynniki niebezpieczne służą do przechowywania próbek z odczynniki chemicznymi potrzebnych do przeprowadzania danego badania. Z dużych pojemników znajdujących się w magazynie centralnym odczynniki przelewane są do mniejszych szklanych pojemniczków. W takiej szafie wydatek jest stały i wynosi 30 m³/h.

Ramiona odciągowe

Kolejnym elementem współpracującym z systemem wentylacji są ramiona odciągowe, które umieszczone są nad stołem laboratoryjnym. Służą one do odprowadzania zanieczyszczeń bezpośrednio nad źródłem ich emisji. Wydatek jest stały i wynosi 100 m³/h.

3.2. CHARAKTERYSTYKA INSTALACJI WENTYLACJI W LABORATORIUM CHEMICZNYM

Przewody w laboratoriach chemicznych wykonuje się z PP-s (polipropylen o właściwościach przeciwwybuchowych), ponieważ materiał ten jest odporny na działanie wszelkich rozpuszczalników, nawet stężonych kwasów i zasad. Co ważne, PP-s jest materiałem przeciwwybuchowym, co w tego typu laboratorium jest kluczowe, gdyż gwarantuje, że nie dojdzie do iskrzenia wywołanego tarciem o siebie zawartych w oparach mikrocząstek, a w konsekwencji do wybuchu. Oczywiście regulator też jest przeciwwybuchowy i w wykonaniu chemoodpornym.

Przed laboratorium znajduje się filtr węglowy, w którym odbywa się trzystopniowa filtracja. W nawiewnikach umieszczone są filtry absolutne typu HEPA. Co ciekawe, w każdym z laboratoriów znajduje się kilka układów, a na każdy z nich składa się kilka dygestoriów. Takie rozwiązanie daje gwarancję, że jeżeli nastąpi awaria jednego układu, to nie zatrzyma to pracy całego laboratorium. Warto pamiętać, że w tego typu laboratorium nie projektuje się klimatyzacji, ponieważ nie można wykorzystać w tym przypadku powietrza obiegowego, gdyż istnieje ryzyko wybuchu. Dodatkowo ze względu na dużą wymianę powietrza całe ciepło odbierane jest przez wyciąg, a pomieszczenie dogrzewane za pomocą grzejników.

4. UWARUNKOWANIA STOSOWANIA WENTYLACJI W LABORATORIUM BIOLOGICZNYM

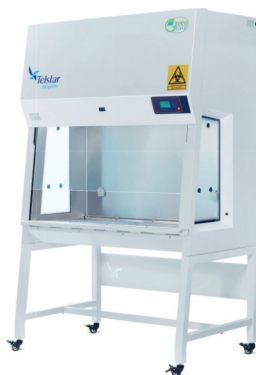
W laboratorium biologicznym wykonuje się prace o innym charakterze. W zależności od tego, czy jest to laboratorium biologiczne, czy łączące różne funkcje, np. laboratorium biologiczno-chemiczne, może występować zarówno nadciśnienie, jak i podciśnienie. Jest to szczególnie ważne, ponieważ do takiego laboratorium nie mogą dostać się cząsteczki powietrza z innych pomieszczeń. Istnieją również takie laboratoria, w których musi być utrzymywane podciśnienie, natomiast rzadko zdarzają się takie, w których różnica ciśnień równa się zero. Temperatura oraz krotność wymiany powietrza są podobne jak w laboratorium chemicznym.

4.1. WYPOSAŻENIE LABORATORIUM BIOLOGICZNEGO WSPÓŁPRACUJĄCE Z SYSTEMEM WENTYLACJI

Na wejściu do laboratorium biologicznego znajduje się prysznic bezpieczeństwa i jest w nim znacznie mniej urządzeń podpiętych do systemu wentylacji wywiewnej niż w przypadku laboratorium chemicznego. W laboratoriach biologicznych stosuje się stoły laboratoryjne wbudowane na stałe, dygestoria oraz zaleca się umieszczenie w tych pomieszczeniach komór bezpiecznej pracy BSC.

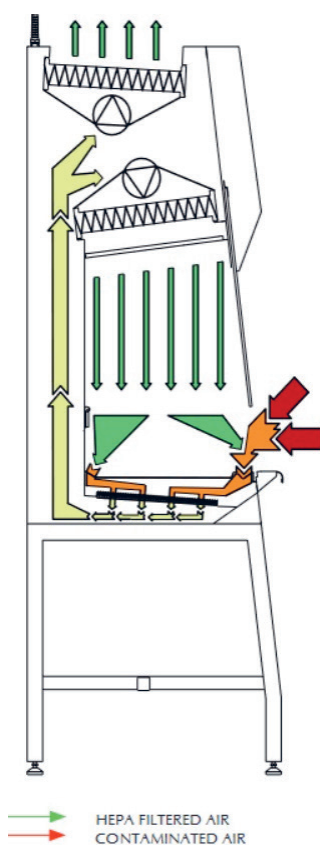
Komory bezpiecznej pracy klasy II

Komory bezpiecznej pracy w laboratorium biologicznym mają za zadanie zmniejszyć ryzyko utworzenia się oraz rozprzestrzeniania bioaerozoli w pomieszczeniu. Komora jest stanowiskiem odizolowanym od otoczenia. Chroni nie tylko personel i otoczenie, ale przede wszystkim materiał biologiczny przed skażeniem. Jest to komora nadciśnieniowa, wyposażona w dwa wentylatory. Jeden jest odpowiedzialny za włączanie powietrza do wnętrza komory, a drugi umieszczony jest w górnej części urządzenia i odpowiada za usuwanie nadmiaru powietrza z wnętrza komory do otoczenia – w tym przypadku bezpośrednio do laboratorium. Za każdym wentylatorem umieszczony jest filtr HEPA. Na rysunku 5 przedstawiono przykładową komorę bezpiecznej pracy klasy II, a na rysunku 6 schemat przepływu powietrza w komorze tego typu.



Rys. 5. Komora bezpiecznej pracy klasy II

Źródło: [5]



Rys. 6. Schemat przepływu powietrza w komorze bezpiecznej pracy klasy II

Źródło: [5]

4.2. CHARAKTERYSTYKA INSTALACJI W LABORATORIUM BIOLOGICZNYM

W przeciwieństwie do laboratoriów chemicznych w laboratoriach biologicznych stosowane są przewody z blachy ocynkowanej, ponieważ w tych pomieszczeniach nie wykonuje się doświadczeń, podczas których mogą być emitowane toksyczne opary. Regulatory nie są w wykonaniu przeciwwybuchowym. W takim pomieszczeniu znajdują się natomiast nawiewniki z filtrem HEPA wyposażone w presostaty, które mają w sobie czujnik: gdy filtr wymaga wymiany, sygnał jest wysyłany do centrali. Ze względu na to, że nie ma zbyt wielu urządzeń podpiętych do systemów wentylacji, za pomocą których można by było odprowadzać powietrze z pomieszczenia, stosuje się dodatkowo również wywiewniki, a czasem także klimakonwektory, lecz w większości przypadków bez nawilżania powietrza. Centrale nie muszą być w wykonaniu higienicznym i mogą być wyposażone w wymiennik ciepła.

5. PODSUMOWANIE

Porównując dwa typy laboratoriów, można wskazać zarówno różnice, jakimi są materiał wykonania instalacji, parametry powietrza wewnętrznego (m.in. ciśnienie) oraz liczba urządzeń podpiętych do systemu wentylacji wywiewnej, jak i podobieństwa, jakimi są m.in. parametry powietrza wewnętrznego: temperatura, wilgotność oraz krotność wymiany powietrza. Największą różnicą jest rodzaj prac wykonywanych w każdym z tych typów laboratoriów. Analizując omówione przykłady, można zauważyć, jak złożona jest instalacja wentylacji i jak jej prawidłowe zaprojektowanie oraz wykonanie wpływa na jej późniejszą skuteczność i sprawność oraz bezpieczeństwo ludzi przebywających w takich pomieszczeniach. W laboratorium o charakterze biologicznym występują mniej złożone i mniej zaawansowane typy rozwiązań niż w przypadku instalacji w laboratoriach chemicznych.

LITERATURA

- [1] Kaiser K., *Wentylacja i klimatyzacja laboratoriów*, Grupa Medium, Warszawa 2014.
- [2] Equimed, *Dygestoria metalowe serii Q-Dynamic*, <https://www.equimed.com.pl/katalog/915-dygestoria-metalowe--serii-q-dynamic/> [dostęp: 22.03.2024].
- [3] Selvita, *Wyjaśnienia do pytań nadesłanych drogą mailową 7. Zapytanie Ofertowe nr 30 04 2021 GW. Wybór Generalnego Wykonawcy*, <https://selvita.com/wp-content/uploads/2021/06/Wyjasnienia-do-pytan-nadeslanych-droga-mailowa-cz.-7-30-04-2021-GW.pdf> [dostęp: 22.03.2024].
- [4] LabDud, *Dygestoria Walk-in*, <https://www.labdud.pl/dygestorium-typu-walk-in.html> [dostęp: 22.03.2024].
- [5] DANLAB, *Komory laminarne BiOptima II klasy bezpieczeństwa z elektrycznym przesuwaniem szyby frontowej*, <https://danlab.pl/nasze-produkty/meble-i-dygestoria/komory-laminarne/komory-laminarne-bioptima-ii-klasy-bezpieczenstwa/> [dostęp: 22.03.2024].

Wiktor Krzewiński*

PROJEKTOWANIE SYSTEMU CHŁODZENIA PODZESPOŁÓW SAMOCHODU ELEKTRYCZNEGO – CHŁODZENIE PASYWNE

Studenckie Koło Naukowe AGH Eko-Energia samodzielnie konstruuje samochód elektryczny „Perła” napędzany energią słoneczną, którego część podzespołów, takich jak silniki oraz ich sterowniki, wymaga chłodzenia w celu zapewnienia ich prawidłowej funkcjonalności. Najpierw rozważano zastosowanie układu chłodzenia pasywnego ze względu na jego wysoką wytrzymałość mechaniczną oraz niski koszt eksploatacji. Zdecydowano się w związku z tym zastosować aluminiowy radiator, który został zbadany w celu wyznaczenia jego maksymalnej temperatury, dzięki wykonaniu symulacji termicznych w oprogramowaniu ANSYS Mechanical 2023 R2. W rezultacie otrzymano szeroki zakres maksymalnych temperatur radiatora, w którego przypadku, w zależności od konkretnej wartości, założenia projektowe mogą być spełnione lub nie. Z tego powodu zaproponowano dalsze kroki, które należy podjąć, aby otrzymać dokładne wyniki temperatury maksymalnej w rozważanym przypadku oraz zapewnić funkcjonalność systemu chłodzenia podzespołów samochodu.

DESIGNING THE COOLING SYSTEM FOR THE COMPONENTS OF AN ELECTRIC VEHICLE – PASSIVE COOLING

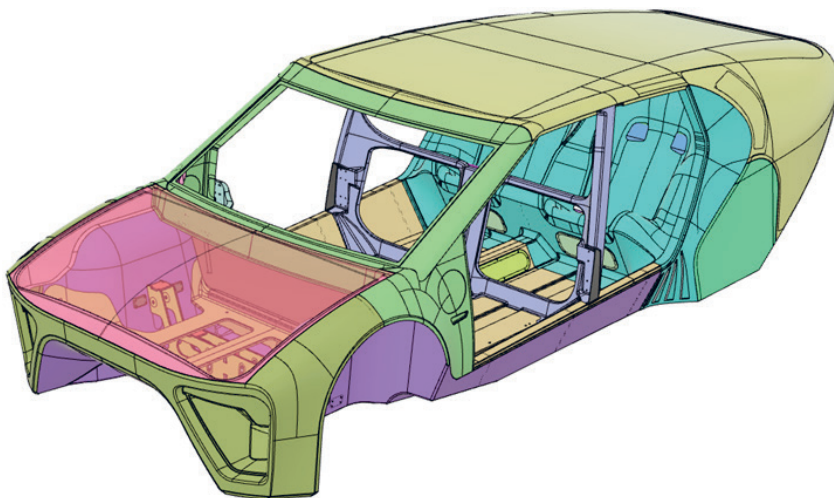
AGH Eko-Energia research group is constructing an electric vehicle named “Perła”, powered by solar energy, whose components such as motors and their controllers require cooling to ensure their proper functionality. Initially, passive cooling was considered due to its high mechanical durability and low operating cost. To achieve this, an aluminum radiator was chosen, which was examined to determine the maximum radiator temperature through thermal simulations conducted in the ANSYS Mechanical 2023 R2 software. The obtained research results presented a wide range of maximum radiator temperatures, which depending on specific values, could either satisfy the design assumptions or not. Consequently, further steps were proposed to obtain accurate maximum temperature results for the considered case and ensure the functionality of the system.

* AGH Akademia Górniczo-Hutnicza, Wydział Energetyki i Paliw, Studenckie Koło Naukowe AGH Eko-Energia.

1. WPROWADZENIE

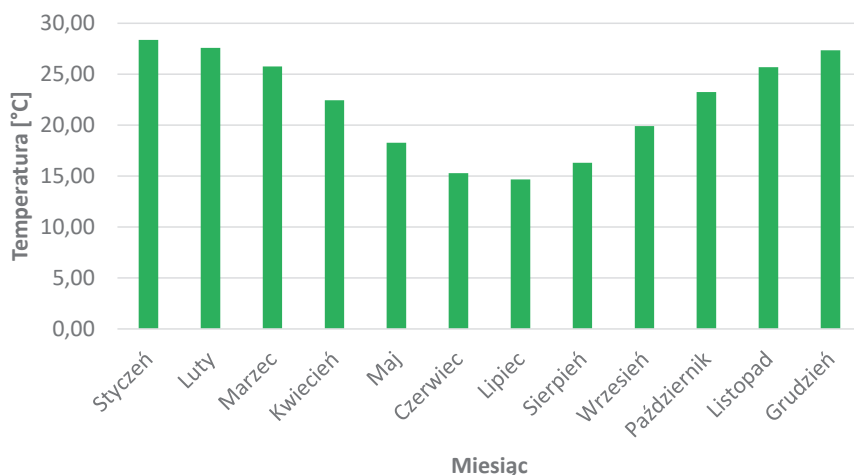
System chłodzenia w pojazdach elektrycznych stosowany jest w celu odprowadzenia nadmiaru ciepła z nagrzewających się komponentów, aby zapewnić ich prawidłowe działanie oraz bezpieczeństwo. W tym celu stosowany może być aktywny system chłodzenia, który charakteryzuje się skutecznym usuwaniem ciepła w dynamicznych warunkach, gdy ilość generowanego ciepła może ulegać zmianom. Pozwala to utrzymać stałą temperaturę w trakcie obciążenia systemu. Wykorzystanie takiego systemu wiąże się natomiast z dodatkowym zużyciem energii na zasilanie jego aktywnych komponentów, takich jak przykładowo pompa cieczy, a dodatkowe źródło zasilania może wprowadzać ograniczenia konstrukcyjne. Alternatywnym rozwiązaniem jest pasywny system chłodzenia, który jest swego rodzaju odwrotnością aktywnego systemu. Nie wymaga on dodatkowego źródła energii, co prowadzi do niższego jej zużycia oraz ze względu na brak ruchomych części jest on z reguły trwalszy i mniej podatny na awarie. Pasywny system chłodzenia nie pozwala na regulowanie ilości ciepła odprowadzanego z układu.

Pojazdy elektryczne mają wiele podzespołów, które wymagają chłodzenia. W przypadku tego artykułu wybór takiego systemu zostanie omówiony na przykładzie „Perły” – samochodu elektrycznego, napędzanego solarnie, który konstruowany jest przez Studenckie Koło Naukowe AGH Eko-Energia (rys. 1). Ponieważ planowano udział załogi „Perły” w zawodach World Solar Challenge, odbywających się w Australii, zostały wzięte pod uwagę panujące tam warunki pogodowe oraz klimat kontynentu.



Rys. 1. Wizualizacja modelu nadwozia samochodu elektrycznego „Perła”

Zima w Australii trwa od początku czerwca do końca sierpnia, z kolei lato od grudnia do lutego – czyli odwrotnie niż w Polsce. Średnie temperatury w poszczególnych miesiącach w trakcie roku zostały przedstawione na rysunku 2.



Rys. 2. Średnie miesięczne temperatury powietrza przy powierzchni ziemi w Australii

Źródło: [1]

Warto również nadmienić, że w Australii maksymalne temperatury mogą osiągać nawet 50°C [2], co zostało uwzględnione w dalszych rozważaniach.

Samochód elektryczny „Perła” wykazuje straty ciepłe, będące efektem działania dwóch silników elektrycznych oraz dwóch sterowników silnika. Wartość maksymalnego obciążenia cieplnego tych podzespołów wyniosła 4,8 kW, a ich przeciętne szacowane obciążenie cieplne wyniosło 2,3 kW. Pojedynczy sterownik silnika generuje średnio 150 W strat cieplnych. Najpierw postanowiono rozważyć aluminiowy radiator jako pasywny system chłodzenia sterownika silnika. W przyjętym rozwiązaniu rozważono wpływ zjawisk takich jak konwekcja oraz promieniowanie na temperaturę maksymalną przy jednoczesnym uwzględnieniu przewodzenia ciepła przez aluminiową konstrukcję radiatora. Przyjęto również maksymalną temperaturę, którą może osiągać sterownik silnika równą 85°C. W przypadku osiągnięcia wartości poniżej tej temperatury sterownik silnika zachowuje maksymalną wartość natężenia prądu, którą jest w stanie przekazać silnikowi [3].

Odnośnie do pasywnych systemów chłodzenia istnieje wiele badań naukowych poświęconych tematyce analiz numerycznych zjawisk dotyczących radiatorów. Niektóre z nich poruszają kwestie związane z jakością chłodzenia wybranych typów radiatorów w przypadku zjawiska konwekcji naturalnej i zestawiają dane eksperymentalne zebrane przy wykorzystaniu analogowych czujników temperatury oraz termogramów z wynikami otrzymanymi na podstawie badań modelowych [4]. Inna publikacja opisuje badania rozkładu pola temperatury odnośnie do tego samego zjawiska, ale z wykorzystaniem aparatury termograficznej, w celu uzyskania danych dotyczących współczynników wymiany ciepła, co pozwala na ustawienie prawidłowych warunków brzegowych na potrzeby późniejszych analiz numerycznych [5]. Ciekawe zagadnienie ze względu na tematykę odnawialnych źródeł energii przybliży artykuł badający wpływ prędkości wiatru owiewającego pasywny radiator na temperaturę pracy i w efekcie sprawność konwersji elektrycznej panelu fotowoltaicznego dzięki wykorzystaniu modelu

numerycznego. Na podstawie tego badania ustalono, że zastosowanie pasywnego chłodzenia pozwala na podwyższenie sprawności elektrycznej całego układu nawet do 18,4% [6]. Omówione publikacje dotyczą interesujących metod badań radiatorów, natomiast ze względu na niekonwencjonalne umiejscowienie sterownika silnika postanowiono przeprowadzić własne badania przy wykorzystaniu analiz numerycznych, aby lepiej odzwierciedlić warunki, w których ma funkcjonować projektowany samochód elektryczny „Perła”. Celem tych analiz jest uzyskanie informacji o maksymalnych temperaturach osiąganych przez radiator i w efekcie ustalenie, czy spełnia on założenia przewidziane w projekcie auta.

2. METODYKA BADAŃ

Do przeprowadzonych badań wykorzystano oprogramowanie ANSYS Mechanical 2023 R2 oraz jedną z powszechnie stosowanych metod służących do numerycznego rozwiązywania problemów brzegowych – metodę elementów skończonych (MES). Metoda ta pozwala na rozwiązywanie cząstkowych równań różniczkowych opisujących dany problem brzegowy przez zamianę ich na układ równań algebraicznych oraz podział domeny obliczeniowej na mniejsze części zwane elementami skończonymi.

Zjawisko wymiany ciepła w rezultacie konwekcji naturalnej zostało opisane przy wykorzystaniu prawa stygnięcia Newtona zgodnie ze wzorem:

$$q = h(T_r - T_{ot}) \quad (1)$$

gdzie:

- q – gęstość strumienia ciepła oddanego do otoczenia przez radiator [W/m^2],
- h – współczynnik wnikania ciepła [$\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$],
- T_r – temperatura powierzchni radiatora [K],
- T_{ot} – temperatura otoczenia [K].

Równanie opisujące gęstość strumienia ciepła wypromieniowanego przedstawione jest poniższym wzorem:

$$q = \epsilon_r F'_{rot} \sigma (T_r^4 - T_{ot}^4) \quad (2)$$

gdzie:

- q – gęstość strumienia ciepła wypromieniowanego przez radiator [W/m^2],
- ϵ_r – emisyjność powierzchni radiatora,
- F'_{rot} – współczynnik konfiguracji pomiędzy powierzchnią radiatora a otoczeniem,
- σ – stała Stefana–Boltzmannia [$\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^2)$],
- T_r – temperatura powierzchni radiatora [K],
- T_{ot} – temperatura otoczenia [K].

Gęstość strumienia ciepła przewodzonego wewnątrz geometrii radiatora opisana jest następującym wzorem:

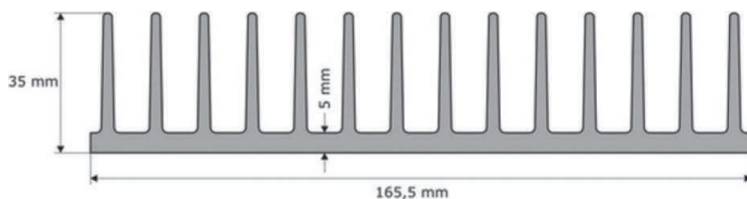
$$q = -k\nabla T \quad (3)$$

gdzie:

- q – lokalna gęstość strumienia ciepła przewodzonego przez radiator [W/m^2],
- k – przewodność cieplna materiału [$\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$],
- ∇T – gradient temperatury [K/m].

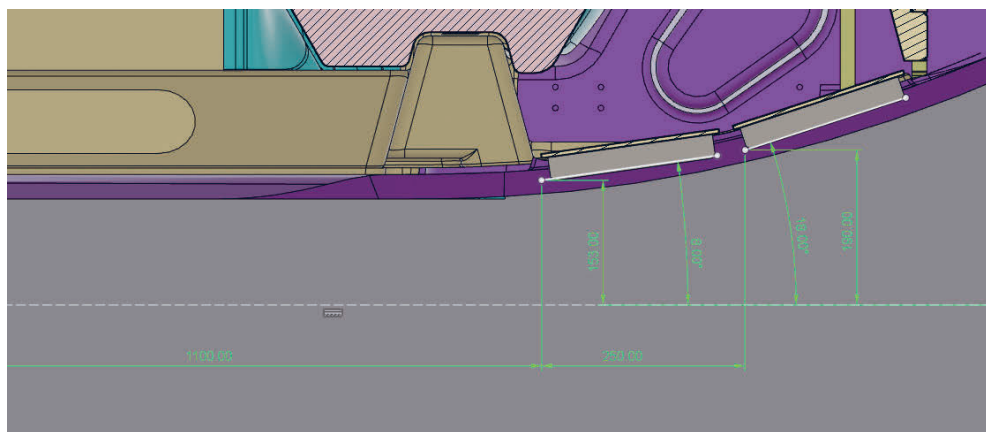
3. MODEL RADIATORA

Pierwotnie rozważanym pomysłem chłodzenia sterowników silnika był pasywny system wykorzystujący aluminiowy radiator skierowany żebrami ku podłożu, o wymiarach podstawy $165,5 \text{ mm} \times 220 \text{ mm}$, będących jednocześnie wymiarami powierzchni sterownika silnika, do której byłby on przymocowany (pozostałe wymiary oraz kształt zostały przedstawione na rysunku 3). Radiator byłby umieszczony od spodu pojazdu w sposób przedstawiony na rysunku 4.



Rys. 3. Wymiary oraz kształt aluminiowego radiatora

Źródło: [7]

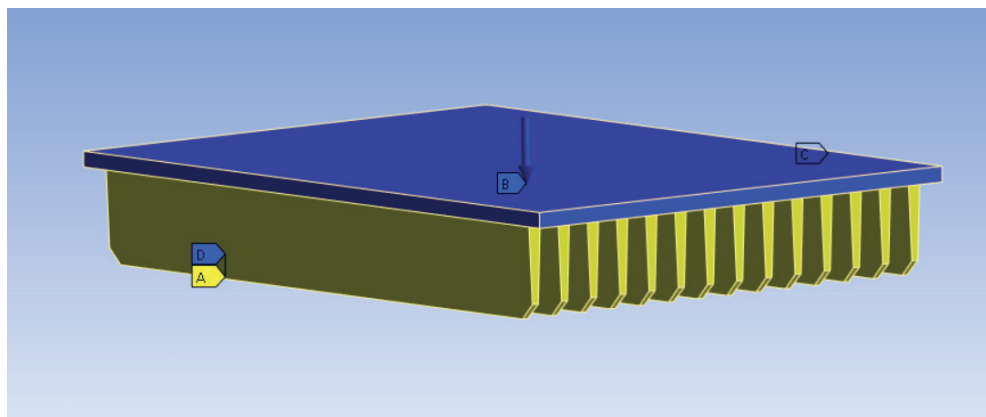


Rys. 4. Umieszczenie radiatora w samochodzie elektrycznym „Perła”

Radiator był badany pod kątem ekstremów temperaturowych, które występowałyby w trakcie postępu pojazdu przy braku wiatru, czyli w warunkach możliwie najmniejszego chłodzenia radiatora. Założono z tego powodu zachodzenie konwekcji naturalnej, a nie wymuszonej, charakteryzującej się dużo mniejszymi wartościami współczynnika wnikania. Wykonano model radiatora (widoczny na rysunku 5), w którego przypadku zostały następnie przeprowadzone symulacje termiczne przy użyciu oprogramowania ANSYS Mechanical 2023 R2. Przeanalizowano łącznie ponad 250 przypadków różniących się wartościami współczynnika wnikania ciepła oraz temperatury otoczenia. Ponadto zostały wykonane symulacje mające na celu określenie dokładności przyjętego modelu dzięki zbadaniu wpływu zagęszczenia siatki na temperaturę maksymalną radiatora. Symulacje były wykonane z wykorzystaniem modelu w stanie ustalonym. Porównano również wartości temperatury maksymalnej radiatora w przypadku modelu uwzględniającego odprowadzanie ciepła z radiatora w efekcie promieniowania i takiego bez uwzględnienia tego zjawiska.

Warunki brzegowe omawianego modelu zostały przedstawione graficznie na rysunku 5 oraz opisane poniżej:

- A – wymiana ciepła przez konwekcję na powierzchni radiatora będącej w kontakcie z powietrzem,
- B – zadany strumień ciepła równy 150 W, przepływający od sterownika silnika,
- C – izolacja termiczna ścianek bocznych podstawy radiatora, strumień ciepła równy 0 W,
- D – wymiana ciepła w efekcie promieniowania pomiędzy powierzchnią radiatora, a otoczeniem.



Rys. 5. Przedstawienie warunków brzegowych modelu radiatora. Objasnienia A–D w tekście
(Images used courtesy of ANSYS, Inc.)

Parametry przyjęte w przypadku aluminiowego radiatora:

- współczynnik emisyjności cieplnej aluminium 0,09 [8],
- współczynnik przewodzenia ciepła aluminium 237 W/(m·K) [9, 10],
- współczynnik wnikania ciepła 1–100 W/(m²·K) [11, 12].

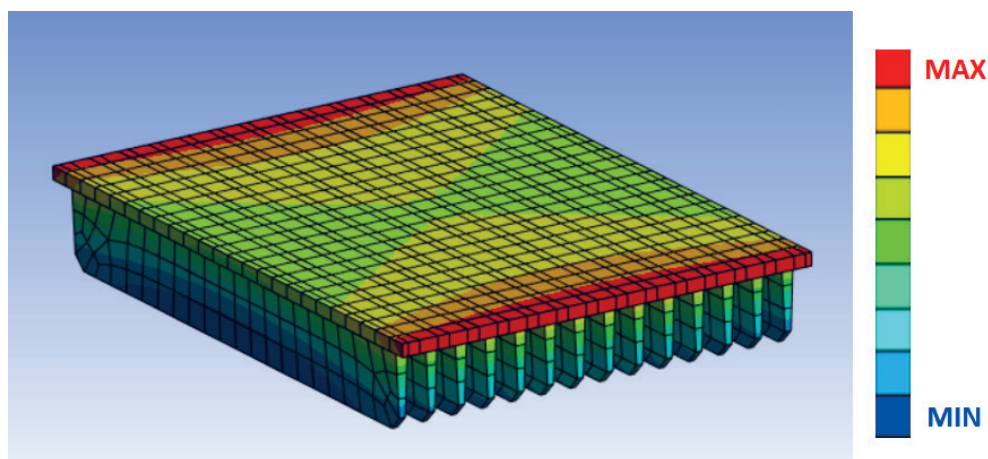
4. WYNIKI

Przeprowadzono symulacje mające na celu ustalenie dokładności przyjętego modelu ze względu na zagęszczenie siatki. Porównano różnicę wartości temperatury maksymalnej radiatora w przypadku siatki o wielkości elementu 0,01 mm (liczba elementów wyniosła 1910) oraz siatki o wielkości elementu 0,005 mm (liczba elementów wyniosła 6414). Różnica ta wyniosła 0,005%. Na podstawie tych wyników postanowiono zastosować prostszy model, którego wyniki nie różniły się w znaczący sposób od modelu dokładniejszego, a zyskano dzięki temu czas obliczeniowy i możliwość przeprowadzenia większej liczby obliczeń.

Zbadano również wpływ promieniowania ciepła z radiatora do otoczenia na maksymalną temperaturę radiatora. Przy niskich wartościach współczynnika wnikania (poniżej $10 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$) różnica temperatury pomiędzy modelem, w którym zostało uwzględnione promieniowanie, i modelem, w którego przypadku nie zostało ono uwzględnione, potrafiła wynosić ponad 100%. Z kolei w sytuacji, gdy wartości współczynnika wnikania są wyższe (powyżej $10 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$), różnice maksymalnej temperatury radiatora pomiędzy modelem z uwzględnieniem promieniowania i bez uwzględnienia go wynosiły jedynie kilka procent. Promieniowanie ma istotny wpływ na wyniki symulacji i zostało wzięte pod uwagę podczas przeprowadzania dalszych symulacji radiatora.

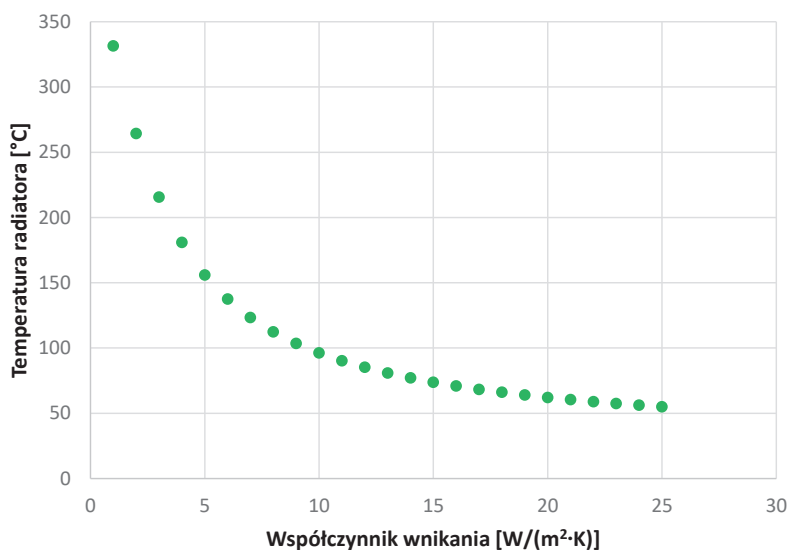
Wyniki uzyskane w trakcie symulacji zostały przedstawione graficznie w postaci rozkładu temperatury w radiatorze (rys. 6) oraz wykresów obrazujących zależność temperatury maksymalnej w radiatorze od badanych parametrów (rys. 7–9).

Widoczny na rysunku 6 rozkład temperatury celowo pozbawiony jest dokładnych wartości ze względu na jego ogólne odniesienie do wyników otrzymanych w wielu przypadkach. Możemy zauważyć, że ożebrowanie charakteryzuje się niższymi wartościami temperatury niż podstawa radiatora, na której powierzchnię bezpośrednio działa strumień ciepła 150 W.



Rys. 6. Rozkład temperatury w modelu radiatora
(Images used courtesy of ANSYS, Inc.)

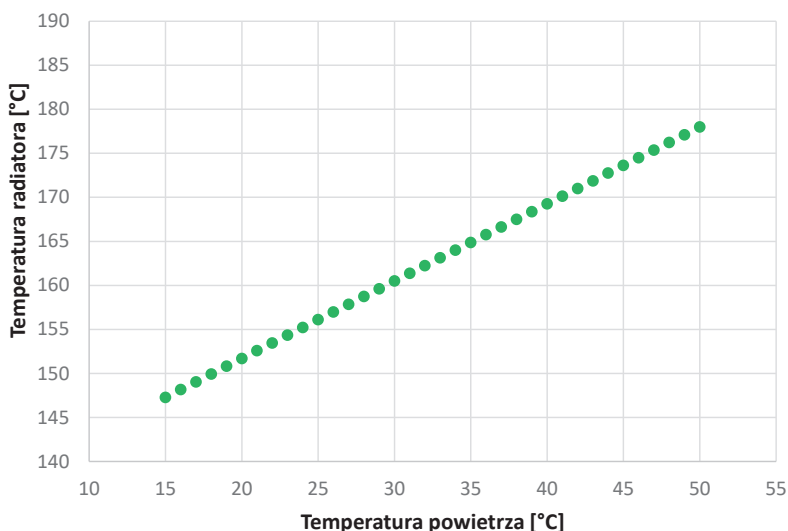
Wykonana została analiza temperatury maksymalnej radiatora względem zmiennej wartości współczynnika wnikania ciepła, przy zachowaniu stałej wartości temperatury otoczenia przedstawionej na rysunku 7. Analiza obrazuje hiperboliczną zależność temperatury maksymalnej radiatora od wartości współczynnika wnikania ciepła. Temperatura maksymalna ulega gwałtownemu zwiększeniu wraz ze zbliżaniem się wartości współczynnika wnikania do $0 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$, co oznacza, że model jest najbardziej czuły w przypadku niskich wartości współczynnika wnikania ciepła. Wykonano również analizę temperatury maksymalnej radiatora względem zmiennej wartości temperatury otoczenia przy stałej wartości współczynnika wnikania ciepła, którą przedstawiono na rysunku 8. Widoczna na niej jest liniowa zależność pomiędzy temperaturą maksymalną radiatora a temperaturą otoczenia. W badanym przedziale temperatury otoczenia zaobserwowano różnicę wynoszącą 30°C pomiędzy poszczególnymi wartościami temperatury maksymalnej, gdy temperatura otoczenia wynosiła 15°C oraz 50°C . Na podstawie rysunków 7 oraz 8 można stwierdzić, że wartość współczynnika wnikania w rozważanym modelu ma dużo większy wpływ na temperaturę radiatora niż temperatura powietrza.



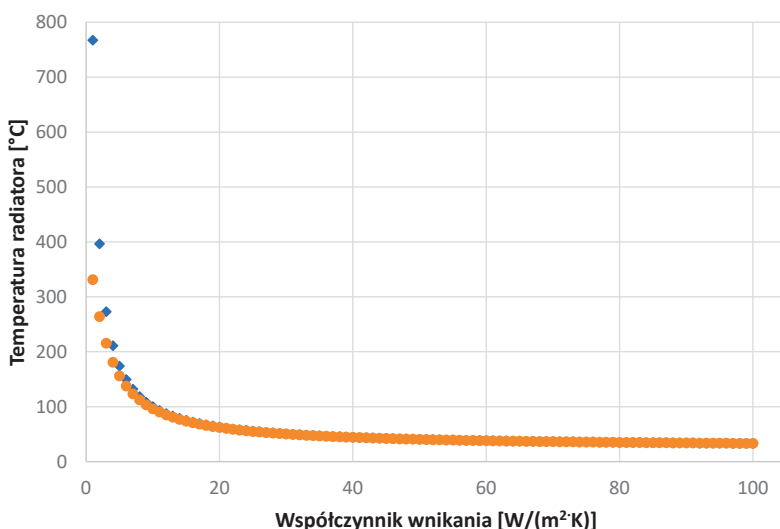
Rys. 7. Maksymalna temperatura radiatora przy stałej temperaturze powietrza 25°C i zmiennej wartości współczynnika wnikania od $1 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ do $25 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$

W celu porównania wpływu promieniowania ciepła na temperaturę maksymalną radiatora z uwzględnieniem promieniowania do otoczenia i bez tego promieniowania przeprowadzono symulacje w obu tych wariantach w przedziale wartości współczynnika wnikania od $1 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ do $100 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$. Wyniki zostały przedstawione na rysunku 9, gdzie kolorem niebieskim zaznaczono dane dotyczące modelu nieuwzględniającego promieniowania, a kolorem pomarańczowym uwzględniającego promieniowanie. W obu przypadkach temperatura zaczyna gwałtownie rosnąć wraz ze spadkiem wartości współczynnika wnikania ciepła, natomiast efekt ten jest dużo silniejszy w przypadku modelu nieuwzględniającego

promieniowania ciepła. Przy wartości współczynnika wnikania ciepła równej $1 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ różnica temperatury maksymalnej pomiędzy modelami wynosi ponad 435°C ($767,21^\circ\text{C}$ w modelu nieuwzględniającym promieniowania oraz $331,57^\circ\text{C}$ w modelu uwzględniającym promieniowanie). Wynika to z zależności opisywanej przez równanie (2).



Rys. 8. Maksymalna temperatura radiatora przy stałej wartości współczynnika wnikania $5 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ i zmiennej temperaturze powietrza od 15°C do 50°C



Rys. 9. Wpływ promieniowania ciepła na maksymalną temperaturę radiatora przy stałej temperaturze powietrza 25°C i zmiennej wartości współczynnika wnikania od $1 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ do $100 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$

Na podstawie równania (1) możemy zauważyć, że w przypadku zjawiska promieniowania ciepła temperatura radiatora ma eksponencjalny wpływ na gęstość strumienia ciepła wypromieniowywanego z jego powierzchni. W zakresie wartości współczynnika wnikania od $10 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ do $100 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$, przyjętego na podstawie pozycji literaturowych [8, 9], różnice temperatury maksymalnej radiatora w modelu bez promieniowania i z promieniowaniem wynoszą odpowiednio 60°C oraz 57°C , co jest zgodne z zależnością wyrażoną równaniem (2).

Maksymalna dopuszczalna temperatura, poniżej której sterownik silnika zachowuje maksymalne natężenie prądu, możliwe do przekazania silnikowi, wynosi 85°C [9]. W przypadku temperatury powietrza równej 25°C temperatura radiatora poniżej wartości maksymalnej jest osiągnięta, gdy wartość współczynnika wnikania ciepła wynosi powyżej $12 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$. Wartość tego współczynnika zależna jest od intensywności zjawiska konwekcji, które w omawianym przypadku zależy od geometrii radiatora, jego ułożenia względem kierunku działania siły grawitacji, różnicy temperatur oraz charakterystyki przepływu. Określić wartość współczynnika wnikania ciepła można w badaniach eksperymentalnych obiektu lub za pomocą symulacji uwzględniającej w domenie obliczeniowej przepływ powietrza w pobliżu radiatora.

5. PODSUMOWANIE

W artykule omówiono zagadnienie symulacji termicznych przy wykorzystaniu MES, na których podstawie uzyskano wyniki rozkładu temperatury w modelu aluminiowego radiatora zastosowanego do chłodzenia sterownika silnika samochodu elektrycznego „Perła”, konstruowanego przez Studenckie Koło Naukowe AGH Eko-Energia. Zbadano wpływ zjawiska promieniowania ciepła, wartości współczynnika wnikania ciepła oraz temperatury otoczenia na temperaturę maksymalną sterownika silnika w trakcie jego pracy, przy uwzględnieniu braku wiatru. Temperatura sterownika silnika wykazuje hiperboliczną zależność od współczynnika wnikania ciepła, uzyskując wartość 331°C , gdy wartości współczynnika wnikania wynoszą $1 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$, przy założeniu temperatury otoczenia równej 25°C . Z kolei wartość graniczna temperatury sterownika, czyli 85°C , jest osiągnięta, gdy współczynnik wnikania ciepła wynosi $12 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$, a w sytuacji, gdy jego wartości wynoszą około $100 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$, temperatura maksymalna radiatora zbliżona jest do temperatury otoczenia. Powyżej wartości współczynnika wnikania ciepła równej $15 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ transport ciepła w efekcie promieniowania może zostać pominięty, wprowadzając błąd poniżej 3°C . Ze względu na szeroki przedział wartości parametru wnikania ciepła, wynoszący od $10 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ do $100 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$, nie udało się jednoznacznie ustalić prawidłowości przyjętego rozwiązania. W przypadku rozważanego modelu radiatora problemem był brak danych dotyczących konkretnej wartości współczynnika wnikania, ponieważ nie wykonano badań eksperymentalnych omawianego radiatora. Nie znaleziono również publikacji naukowych, na których podstawie można by zastosować korelację w rozważanym przypadku. Wymiana ciepła w rezultacie wnikania jest bardzo skomplikowanym zjawiskiem, którego nie da się w prosty sposób opisać bez znajomości dokładnej wartości współczynnika wnikania w danej sytuacji. Następnie niezbędne jest wykonanie pomiarów eksperymentalnych badanego obiektu lub symulacji termiczno-przepływowej uwzględniającej zachowanie płynu, aby wyznaczyć dokładną wartość współczynnika wnikania ciepła w rozważanym przypadku i tym samym określić, czy proponowane rozwiązanie spełnia założenia projektowe.

LITERATURA

- [1] *Current Climate – Climatology*, Climate Change Knowledge Portal, World Bank, <https://climateknowledgeportal.worldbank.org/country/australia/climate-data-historical> [dostęp: 13.02.2024].
- [2] Granwal L., *Hottest temperatures Australia 2022, by location*, <https://www.statista.com/statistics/960599/hottest-temperatures-australia/> [dostęp: 13.02.2024].
- [3] *AC F6-A AC Motor Controller with VCL*, Curtis Instruments, https://cdn.curtisinstruments.com/products/datasheets/ACF6A_datasheet_en.pdf [dostęp: 14.02.2024].
- [4] Klecha D., Minkina W., *Układ pomiarowy do badań charakterystyk chłodzenia radiatorów z wykorzystaniem pomiarów termowizyjnych*, Zeszyty Naukowe Wydziału Elektrotechniki i Automatyki Politechniki Gdańskiej, nr 54, 2017, s. 117–121.
- [5] Grabowski M., Urbaniec K., Wernik J., Wołosz K.J., *Numerical simulation and thermographic examination of the heat transfer in a radiator*, Chemical Engineering Transactions, vol. 52, 2016, s. 493–498, <https://doi.org/10.3303/CET1652083>.
- [6] Wodołański A., *Numeryczna analiza poprawy wydajności hybryd PV/TEG chłodzonych pasywnym przepływem powietrza*, Przegląd Elektrotechniczny, R. 97, nr 2, 2021, s. 20–23, <https://doi.org/10.15199/48.2021.02.05>.
- [7] *Radiator; Kęty; A4291; 5kg/m*, Firma Piekarz – Części Elektroniczne, <https://www.piekarz.pl/01224-radiator-kety-a4291-5kg-m/> [dostęp: 15.02.2024].
- [8] *Surface Emissivity Coefficients, The radiation heat transfer emissivity coefficients for some common materials like aluminum, brass, glass and many more*, The Engineering ToolBox, https://www.engineeringtoolbox.com/emissivity-coefficients-d_447.html [dostęp: 13.02.2024].
- [9] Zhang A., Li Y., *Thermal conductivity of aluminum alloys – a review*, Materials, vol. 16(8), 2972, <https://doi.org/10.3390/ma16082972>.
- [10] *Metals, Metallic Elements and Alloys – Thermal Conductivities. Thermal conductivities of common metals, metallic elements and alloys*, The Engineering ToolBox, https://www.engineeringtoolbox.com/thermal-conductivity-metals-d_858.html [dostęp: 19.02.2024].
- [11] *Film Coefficient*, ANSYS, Inc., <https://courses.ansys.com/wp-content/uploads/2020/08/Lesson-2-Film-Coefficient-tp.pdf> [dostęp: 19.02.2024].
- [12] *Convective Heat Transfer Coefficients Table Chart*, Engineers Edge, https://www.engineersedge.com/heat_transfer/convective_heat_transfer_coefficients__13378.htm [dostęp: 19.02.2024].

Karol Kuglarz*, Grzegorz Michta**

MIKROSTRUKTURA DZIEŚĘCIOWARSTWOWEGO PLATERU Fe ARMCO – Ti GR.1 – Al 1050 PO PRZERÓBCE PLASTYCZNEJ

W artykule przybliżono pojęcie zgrzewania (inaczej: platerowania) wybuchowego. Omówiono także podstawy tego procesu oraz jego zalety w stosunku do innych technologii łączenia materiałów. Następnie przedstawiono materiały składowe, które zostały wykorzystane do otrzymania blachy platerowanej. Dodatkowo zaprezentowano sprzęt badawczy oraz metodykę przeprowadzonych badań. Prezentację wyników rozpoczęto od przedstawienia wpływu procesu platerowania oraz procesu walcowania na grubość dziesięciowarstwowego plateru. Następnie podano wyniki badań mikrostruktury zarówno materiałów składowych, jak i złączy platerowanych po procesie zgrzewania wybuchowego. Przeanalizowano je i wskazano wpływ tego procesu na mikrostrukturę. Ponadto pokazano charakterystyczną dla tego procesu falkę, która występuje w strefie złącza. Podobnej analizie poddano proces walcowania przeprowadzonego na otrzymanym dziesięciowarstwowym platerze. W trakcie badań wskazano miejsca z rozwarstwieniem plateru i omówiono jego przyczynę. W celu potwierdzenia badań przeprowadzono analizę składu chemicznego otrzymanych złączy. Całość pracy została podsumowana oraz przedstawiono możliwości aplikacyjne tego unikatowego materiału.

MICROSTRUCTURE OF TEN-LAYER CLADDING MATERIAL Fe ARMCO – Ti GR.1 – Al 1050 AFTER THE ROLLING PROCESS

The paper presents the concept of explosive cladding. It also discusses the basics of this process and its advantages over other material joining technologies. Then the component materials that were used to obtain the plated sheet are presented. In addition, the research equipment and methodology of the research conducted were presented. The presentation of the results began with a presentation of the effect of the cladding process and the rolling process on the thickness of the 10-layer clad plate. Next, the results of microstructure studies of both component materials and plated joints after the explosive welding process were presented. They were analysed and the effect of this process on the microstructure was indicated. In addition, the waviness occurring in the joint zone, characteristic of this process, was demonstrated. A similar analysis was performed for the rolling process carried out on the obtained 10-layer clad. During the investigation, areas with delamination of the plating layer were indicated, discussing its cause. Finally, an analysis of the chemical composition of the obtained joints was carried out to confirm the study. The entire study was summarized and the application possibilities of this unique material were presented.

* AGH Akademia Górniczo-Hutnicza, Wydział Inżynierii Metali i Informatyki Przemysłowej, Koło Naukowe Metaloznawców.

** AGH Akademia Górniczo-Hutnicza, Wydział Inżynierii Metali i Informatyki Przemysłowej.

1. WSTĘP

Inżynieria materiałowa jest nauką związaną z wytwarzaniem nowych materiałów lub konstrukcji i jako dziedzina interdyscyplinarna wymaga od inżynierów obszernej wiedzy z wielu obszarów. Z uwagi na produkcję coraz bardziej zaawansowanych materiałów pojawia się konieczność stosowania kilku procesów. Przykładem tego jest opisany w niniejszym opracowaniu dziesięciowarstwowy kompozyt metaliczny składający się z trzech materiałów: żelaza armco, tytanu Gr. 1 i stopu aluminium Al 1050. Wspomniany kompozyt został wytworzony metodą zgrzewania, a następnie poddany procesowi walcowania. Jednak, aby mógł on osiągnąć swoje docelowe zastosowanie, konieczne jest opracowanie technologii obróbki cieplnej pozwalającej na uzyskanie określonej mikrostruktury. Ponadto niezbędne będzie opracowanie technologii jego formowania i spajania, tak aby materiał ten mógł być wykorzystany do wykonywania elementów konstrukcyjnych.

W artykule został opisany wpływ procesu walcowania na dziesięciowarstwową blachę platerowaną. Plater został wytworzony przez firmę EXPLOMET z siedzibą w Opolu, a walcowanie realizowano w Politechnice Częstochowskiej.

2. PLATEROWANIE WYBUCHOWE

Platerowanie (zgrzewanie) wybuchowe jest procesem łączenia metali z wykorzystaniem energii detonacji konwencjonalnego materiału wybuchowego (MW). Ładunek MW odpowiednio rozprowadzony na powierzchni pierwszej (tzw. napędzanej lub lotnej) blachy eksplodując, wytwarza gazy o wysokim ciśnieniu. Blacha zostaje napędzona i odkształca się w obszarze przebiegającego frontu detonacji, zderzając się z kolejną warstwą – kolejną blachą. W punkcie kontaktu następuje bardzo silne uplastycznienie łączonych materiałów i ich połączenie. Technologia zgrzewania wybuchowego używanego do wytwarzania platerów w porównaniu z innymi przemysłowymi metodami łączenia powierzchniowego takimi jak walcowanie pakietowe czy napawanie ma kilka zalet. Po pierwsze pozwala łączyć wiele różnych metali i ich stopów. Jest to metoda, która pozwala jednocześnie łączyć materiały metaliczne w największym przedziale grubości nakładanych blach oraz elementów stanowiących materiał podstawowy (bazowy). Tym ostatnim mogą być blachy lub krążki swobodnie kute. Technologia ta pozwala też w jednym akcie strzałowym połączyć nawet do kilkudziesięciu warstw, oczywiście odpowiednio cienkich materiałów metalicznych; proces ten nazywany jest zgrzewaniem/platerowaniem symultanicznym [1–3].

3. MATERIAŁY STOSOWANE DO BADAŃ

Materiałem użytym do badań był dziesięciowarstwowy plater w postaci pakietu blach, który został wytworzony metodą zgrzewania wybuchowego przez firmę EXPLOMET. Ten metaliczny kompozyt był złożony z trzech materiałów: warstwy zewnętrzne stanowiło żelazo armco, natomiast warstwy wewnętrzne stanowiły naprzemiennie ułożony stop aluminium Al 1050 i tytan Gr. 1. Składy chemiczne użytych materiałów przedstawiono w tabelach 1–3. Cechą wspólną materiałów użytych do wytworzenia plateru była ich wysoka czystość.

Tabela 1. Skład chemiczny żelaza armco [% wag.]

C	Si	Mn	Cr	Ni	S	P	Mo	Fe
0,02	0,01	0,07	0,02	0,03	0,002	0,002	0,02	reszta

Źródło: [4]

Tabela 2. Skład chemiczny stopu Al 1050 [% wag.]

Ti	Zn	Mn	Fe	Si	Mg	Cu	Al
0,05	0,07	0,05	0,4	0,25	0,05	0,05	reszta

Źródło: [5]

Tabela 3. Skład chemiczny tytanu Gr. 1 [% wag.]

C	Fe	N	O	H	Ti
0,08	0,02	0,03	0,18	0,015	reszta

Źródło: [6]

4. METODYKA BADAŃ

Z materiałów w stanie dostawy, tj. po procesach platerowania oraz walcowania, wycięto próbki o wymiarach 10 mm × 10 mm. Próbki zostały wycięte przy użyciu wody. Metoda ta pozwala uniknąć ewentualnego nagrzewania materiału i wystąpienia zmian mikrostrukturalnych. W kolejnym kroku z próbek przygotowano zglądy metalograficzne, które następnie zostały poddane obserwacjom przy użyciu:

- mikroskopu świetlnego (LM, *light microscope*) – zastosowano różne techniki obrazowania, takie jak: jasne pole widzenia (DIC, *differential interference contrast*) oraz kontrast Nomarskiego;
- skaningowego mikroskopu elektronowego (SEM, *scanning electron microscope*) Merlin Gemini II firmy Zeiss, który ma wbudowany system mikroanalizy EDS (*energy dispersive X-ray spectroscopy*) – tu również zastosowano różne techniki obrazowania, takie jak: elektrony wtórne (SE, *secondary electron*) i elektrony wstecznie rozproszone (BSE, *backscattered electron*).

Obserwacje mikrostruktury wykonano na zglądach trawionych przy użyciu odczynników, których skład chemiczny został przedstawiony w tabeli 4 (odczynnik do trawienia tytanu) i tabeli 5 (odczynnik do trawienia aluminium). Natomiast żelazo armco wytrawiono Nitaliem o stężeniu 1%.

Tabela 4. Skład chemiczny odczynnika do trawienia tytanu [ml]

HNO ₃	HF	H ₂ O
2	2	96

Tabela 5. Skład chemiczny odczynnika do trawienia aluminium [ml]

H ₂ SO ₄	HF	H ₂ O
10	5	85

5. CZĘŚĆ BADAWCZA

W celu oceny jakości wykonanego połączenia, a także określenia wpływu procesu zgrzewania wybuchowego i walcowania na mikrostrukturę oraz własności materiału przeprowadzono badania makrostruktury i mikrostruktury oraz analizę składu chemicznego.

5.1. BADANIA MAKROSTRUKTURY

Badania makrostruktury miały na celu pokazanie wpływu procesu platerowania, a następnie walcowania na grubość platerowanej blachy. W tym celu przy użyciu programu ImageJ dokonano pomiaru grubości każdego z materiałów użytych do produkcji wyrobu. Następnie przeprowadzono pomiar grubości każdej z warstw plateru po procesie zgrzewania wybuchowego. Pomiary te powtórzono po procesie walcowania. Wyniki pomiarów zostały przedstawione w tabeli 6.

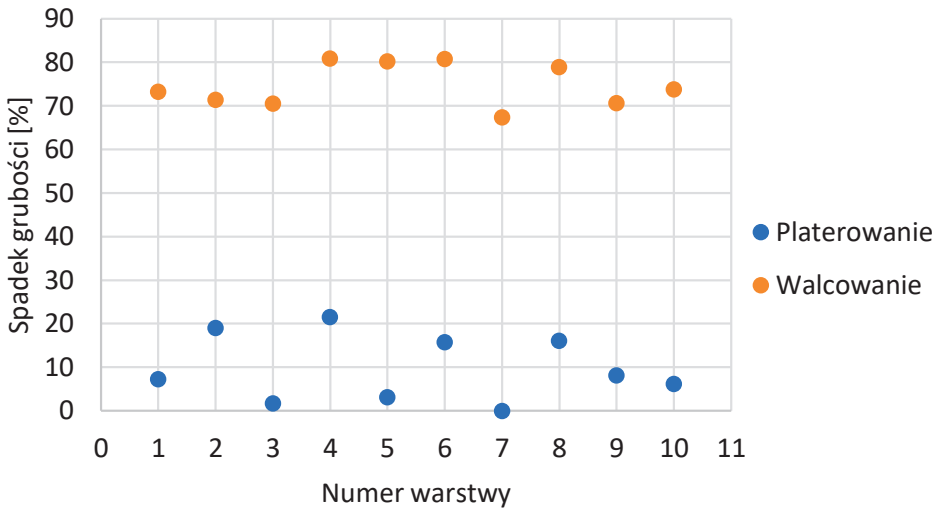
Wartość grubości każdej z warstw plateru jest średnią z 18 pomiarów. Na podstawie otrzymanych wyników można stwierdzić, że proces platerowania spowodował pocienienie blachy o 0,7 mm, natomiast walcowanie pozwoliło na zmniejszenie grubości blachy o kolejne 5,7 mm.

Ponadto w celu sprawdzenia, czy położenie danego materiału w całym układzie wpływa na poziom jego odkształcenia, obliczono procent spadku grubości. Wyniki przedstawiono na rysunku 1.

Zmniejszenie grubości w procesie platerowania było liczone względem grubości materiału w stanie dostawy, natomiast spadek grubości po procesie walcowania był liczony względem grubości po procesie platerowania. Na podstawie wykresu można stwierdzić, że położenie danego materiału względem powierzchni, na której dochodzi do inicjacji wybuchu oraz docisku w trakcie walcowania, nie ma znaczącego wpływu na poziom jego odkształcenia. Jednak widoczne jest, że w procesie platerowania znacznie bardziej odkształca się aluminium, co wynika z faktu, że jest to metal bardziej miękki w porównaniu z tytanem. Świadczy o tym twardość, która dla aluminium wynosi 20 HB, a dla tytanu 120 HB [7, 8].

Tabela 6. Grubość poszczególnych warstw

Warstwa		Grubość [mm]		
		w stanie dostawy	po platerowaniu	po walcowaniu
Materiał nakładany	Fe	1,521	1,410	0,376
	Al	0,553	0,448	0,128
	Ti	0,778	0,765	0,226
	Al	0,553	0,434	0,083
	Ti	0,778	0,754	0,149
	Al	0,553	0,466	0,089
	Ti	0,778	0,778	0,254
	Al	0,553	0,464	0,098
	Ti	0,778	0,715	0,210
Materiał podstawowy	Fe	1,521	1,427	0,373
	Suma [mm]			
		8,366	7,661	1,986

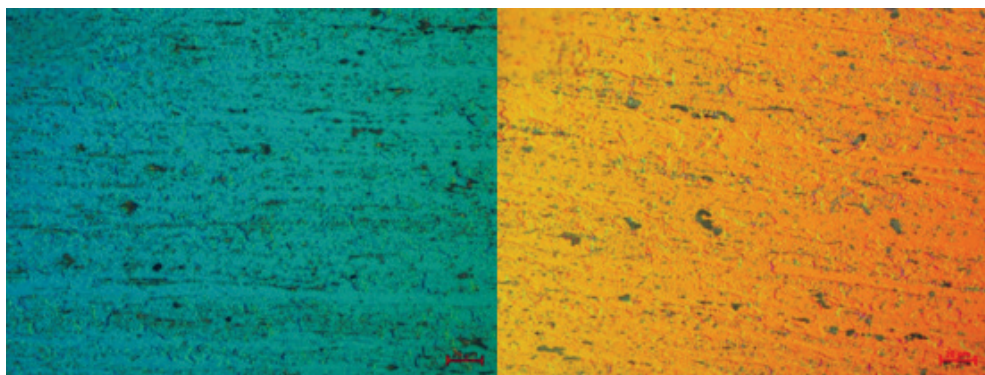


Rys. 1. Wpływ procesu platerowania i walcowania na grubość poszczególnych warstw

5.2. BADANIA MIKROSTRUKTURY

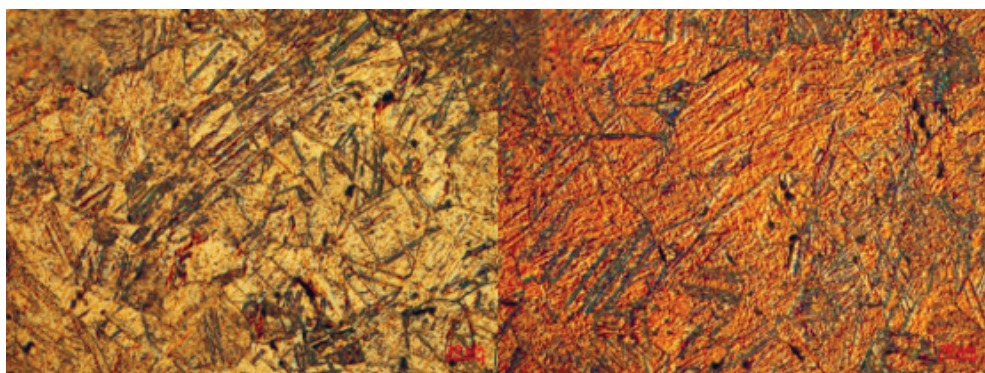
Badania mikrostruktury przeprowadzono na materiale w stanie dostawy na próbce z blachy po zgrzewaniu wybuchowym oraz na próbce z blachy po procesie walcowania. Dzięki temu możliwe było określenie wpływu poszczególnych procesów na mikrostrukturę materiału.

Jako pierwszą obserwowano mikrostrukturę materiałów w stanie dostawy. Na rysunku 2 przedstawiono mikrostrukturę stopu Al 1050.



Rys. 2. Mikrostruktura stopu Al 1050 w stanie dostawy, LM, zgląd trawiony, różne obszary wykonania zdjęć

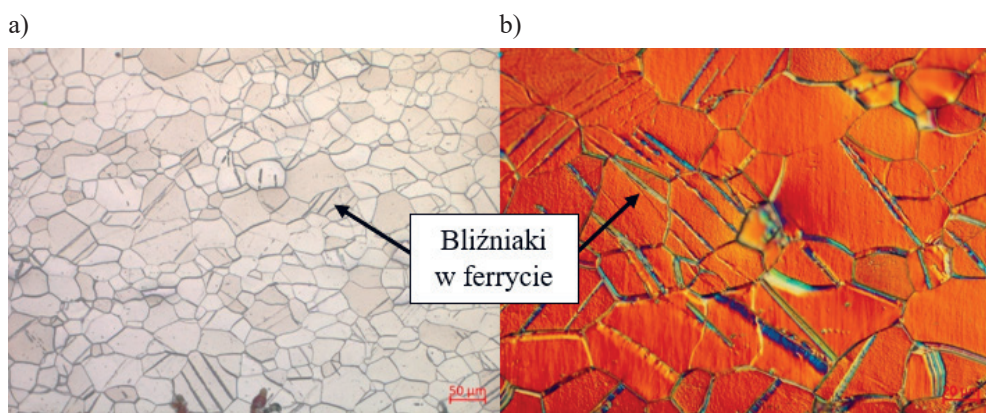
Następnie zbadano mikrostrukturę tytanu Gr. 1, wyniki przedstawiono na rysunku 3.



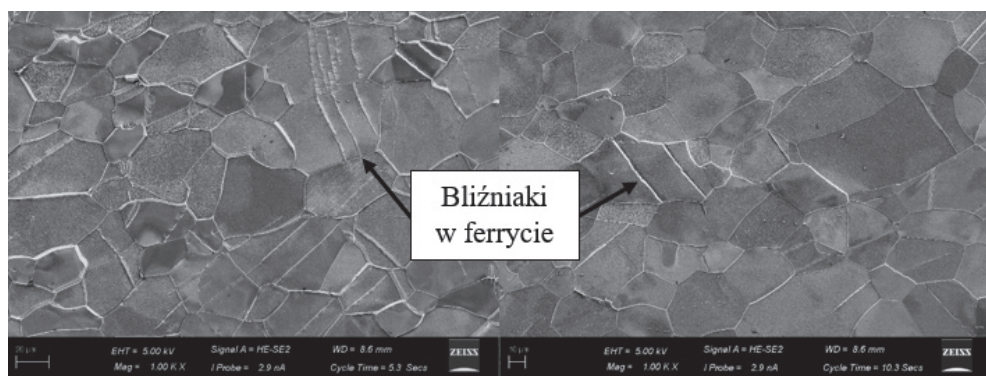
Rys. 3. Mikrostruktura tytanu Gr. 1 w stanie dostawy, LM, zgląd trawiony, różne obszary wykonania zdjęć

Następnie dokonano obserwacji mikrostruktury żelaza armco, ale już po procesie platerowania. Wyniki przedstawiono na rysunkach 4 i 5.

Na rysunkach 4 i 5 można zauważyć, że doszło do powstania bliźniaków w ferrycie. Jest to spowodowane charakterystyką procesu zgrzewania wybuchowego, gdzie mamy do czynienia z dużą szybkością łączenia przy bardzo wysokim ciśnieniu i niskiej temperaturze. Przy użyciu programu ImageJ dokonano pomiaru powierzchni ziarna żelaza armco po procesie platerowania – jej wartość wyniosła $1520 \mu\text{m}^2$ [9–11].



Rys. 4. Mikrostruktura żelaza armco po procesie platerowania, LM, zgląd trawiony: a) jasne pole widzenia; b) DIC

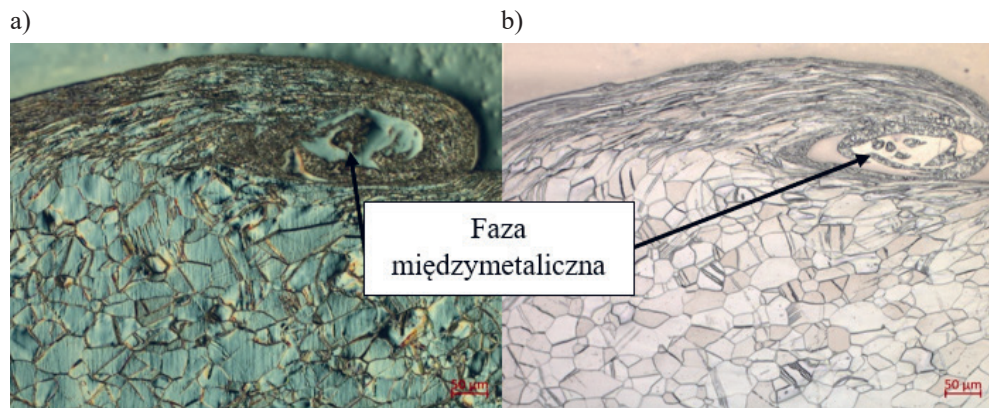


Rys. 5. Mikrostruktura żelaza armco po procesie platerowania, SEM, zgląd trawiony

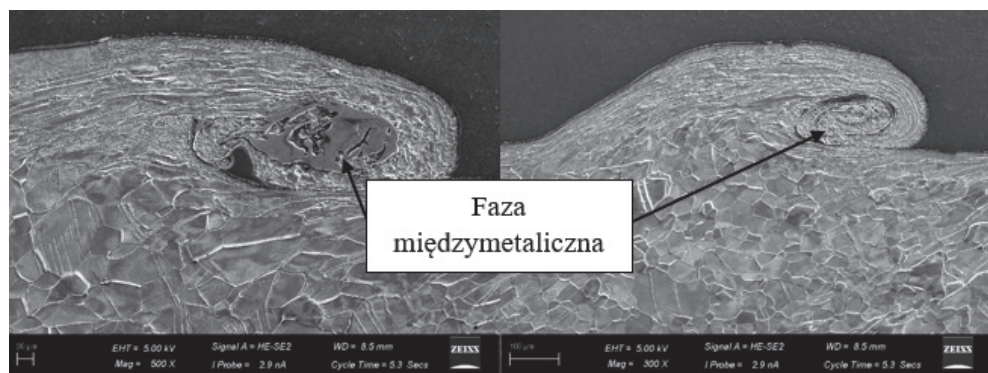
Obserwacji poddano również złącza powstałe w procesie platerowania. Jako pierwsze zbadano połączenie żelazo armco – tytan Gr. 1. Wyniki zostały przedstawione na rysunkach 6 i 7.

Badaniom poddano również złącze żelaza armco ze stopem Al 1050. Wyniki zostały pokazane na rysunku 8.

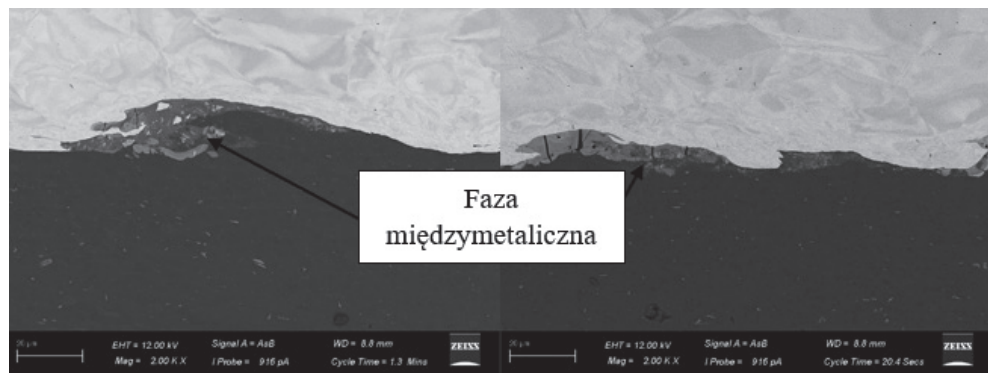
Jako ostatnie poddano obserwacji złącze stopu Al 1050 z tytanem Gr. 1, rezultaty przedstawiono na rysunku 9.



Rys. 6. Mikrostruktura złącza żelazo armco – tytan Gr. 1, LM: a) DIC; b) jasne pole



Rys. 7. Złącze żelazo armco – tytan Gr. 1, SEM, zgląd trawiony



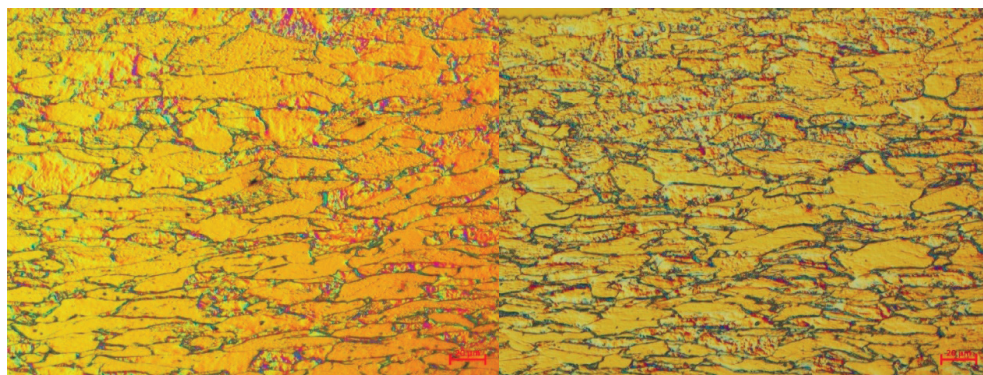
Rys. 8. Złącze żelazo armco – stop Al 1050, SEM



Rys. 9. Złącze stop Al 1050 – tytan Gr. 1, SEM

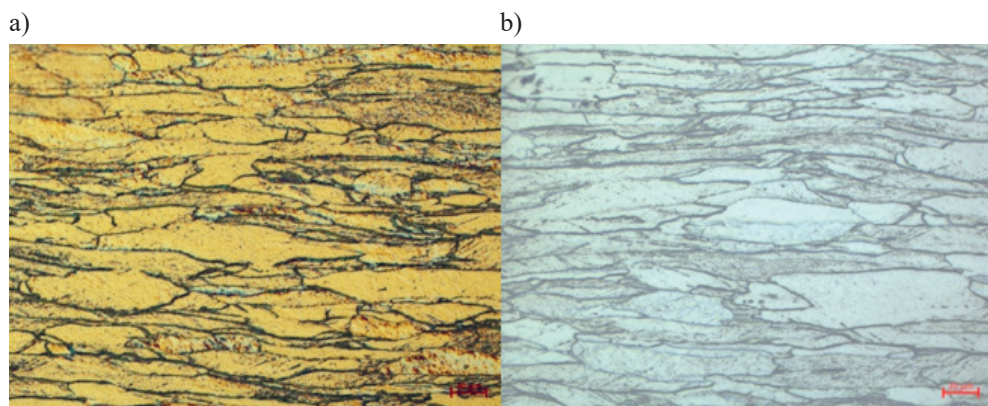
Rysunki 6–9 wyraźnie pokazują charakterystyczną cechę zgrzewania wybuchowego, którą jest powstanie połączenia falistego w miejscu styku materiałów. Co więcej, w wyniku uplastycznienia materiałów w procesie zgrzewania dochodzi do ich wymieszania i powstania w miejscu łączenia faz międzymetalicznych.

Następnie badania przeprowadzono na blasze po procesie walcowania. Jako pierwszą obserwacji poddano warstwę blachy wykonanej z żelaza armco, przykładową mikrostrukturę pokazano na rysunkach 10 i 11.



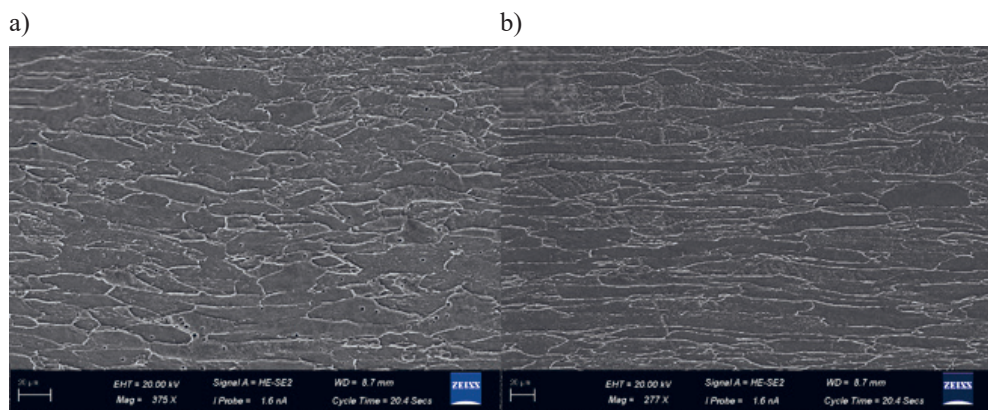
Rys. 10. Mikrostruktura żelaza armco po procesie walcowania, LM, zgląd poprzeczny, trawiony, DIC

Mikrostrukturę materiału obserwowano zarówno na zglądzie poprzecznym, jak i wzdłużnym. Rysunek 11 obrazujący zgląd wzdłużny wyraźnie pokazuje, że doszło do wydłużenia ziaren w kierunku walcowania.



Rys. 11. Mikrostruktura żelaza armco po procesie walcowania, LM, zgląd wzdłużny, trawiony:
a) DIC; b) jasne pole widzenia

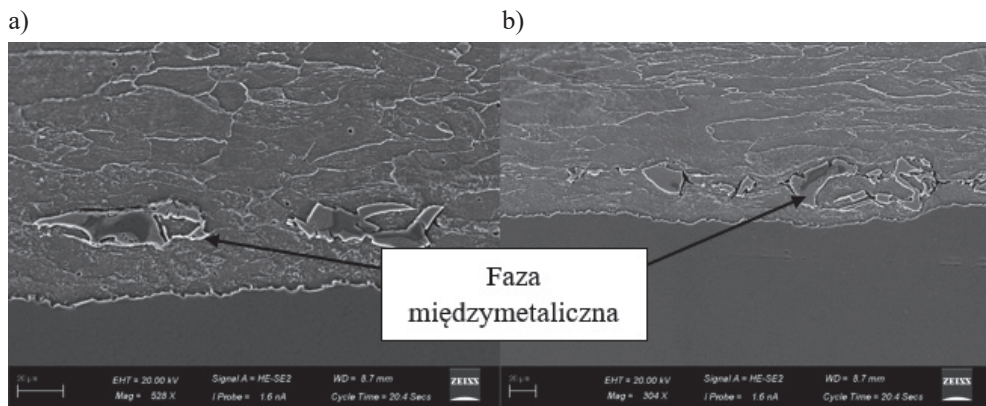
Te same obserwacje przeprowadzono przy użyciu mikroskopu SEM. Ich rezultaty przedstawia rysunek 12.



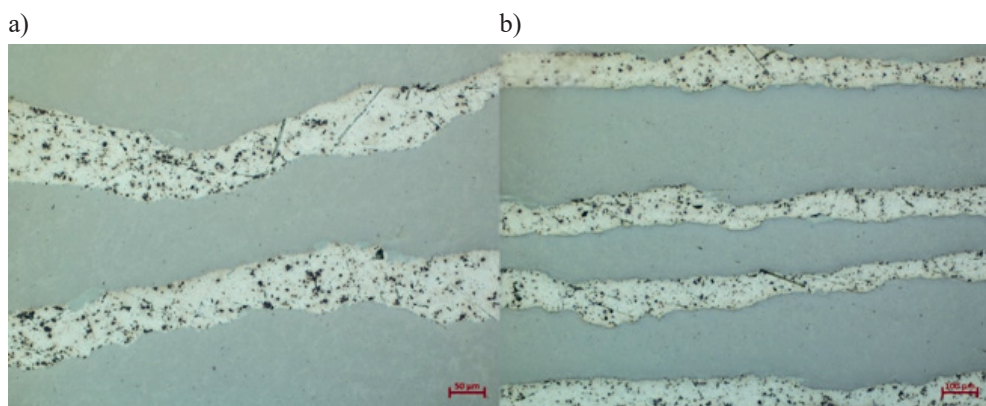
Rys. 12. Mikrostruktura żelaza armco po procesie walcowania, SEM, zgląd trawiony:
a) poprzeczny; b) wzdłużny

Następnie przeprowadzono badania złączy platerowanych po procesie walcowania. Jako pierwsze obserwowano złącze żelaza armco z tytanem Gr. 1. Wyniki przedstawiono na rysunku 13.

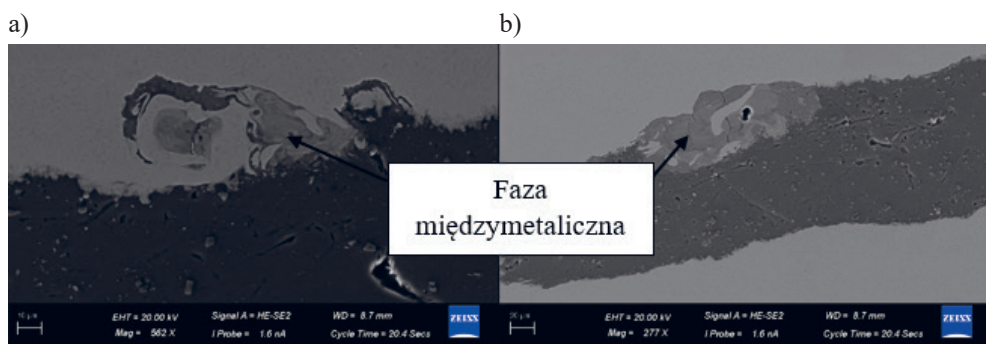
Te same obserwacje dokonano na złączu stopu Al 1050 z tytanem Gr. 1. Ich rezultaty przedstawiono na rysunkach 14 i 15.



Rys. 13. Mikrostruktura złącza żelazo armco – tytan Gr. 1 po procesie walcowania, SEM, zgląd trawiony: a) poprzeczny; b) wzdłużny



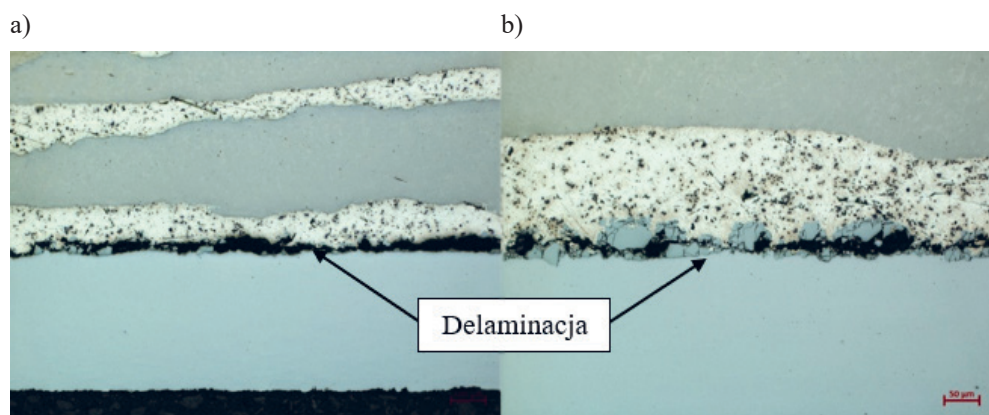
Rys. 14. Mikrostruktura złącza stop Al 1050 – tytan Gr. 1 po procesie walcowania, LM, zgląd trawiony: a) wzdłużny; b) poprzeczny



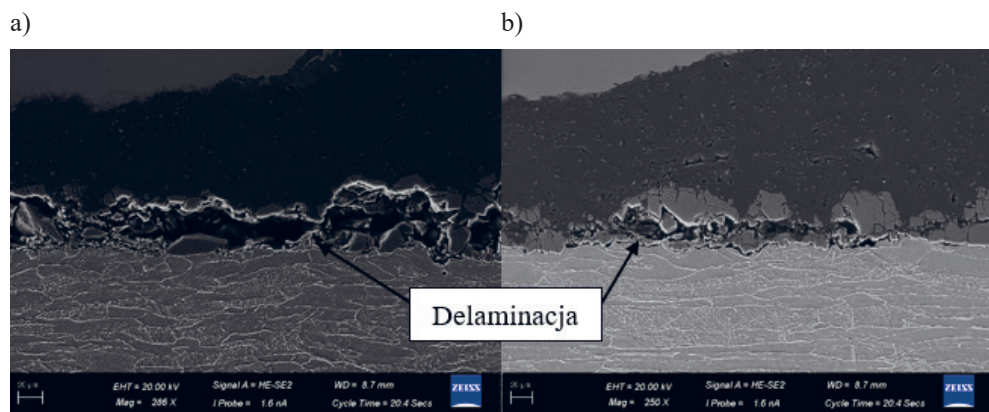
Rys. 15. Mikrostruktura złącza stop Al 1050 – tytan Gr. 1 po procesie walcowania, SEM, zgląd trawiony: a) poprzeczny; b) wzdłużny

Na rysunkach 13–15 można zauważyć, że w wyniku procesu walcowania dochodzi do zniknięcia charakterystycznego falistego połączenia.

Ostatnim złączem poddanym obserwacjom mikroskopowym było połączenie żelaza armco ze stopem Al 1050. Badanie to pozwoliło stwierdzić, że proces walcowania przebiegł prawidłowo, ponieważ udało się odkształcić plater, jednak wskutek powstania kruchych faz międzymetalicznych doszło do procesu delaminacji pomiędzy poszczególnymi warstwami. Wyniki badania pokazano na rysunkach 16 i 17.



Rys. 16. Mikrostruktura złącza stop Al 1050 – tytan Gr. 1 po procesie walcowania, SEM, zgląd trawiony: a) poprzeczny; b) wzdłużny

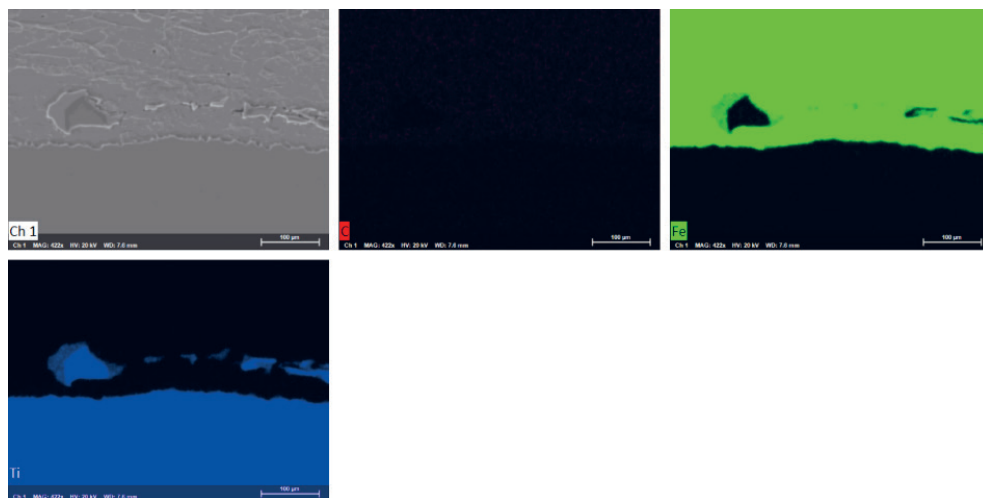


Rys. 17. Mikrostruktura złącza stop Al 1050 – tytan Gr. 1 po procesie walcowania, SEM, zgląd trawiony: a) poprzeczny; b) wzdłużny

W przypadku tego połączenia powstały liczne pęknięcia i doszło do delaminacji w miejscu występowania fazy międzymetalicznej.

5.3. ANALIZA SKŁADU CHEMICZNEGO

Kolejnym przeprowadzonym badaniem była analiza składu chemicznego, która miała pokazać, w jakim stopniu doszło do wymieszania materiałów w obszarach ich złączy. Pierwszym przebadanym złączem było połączenie żelaza armco z tytanem Gr. 1. Wyniki analizy zostały przedstawione na rysunku 18.



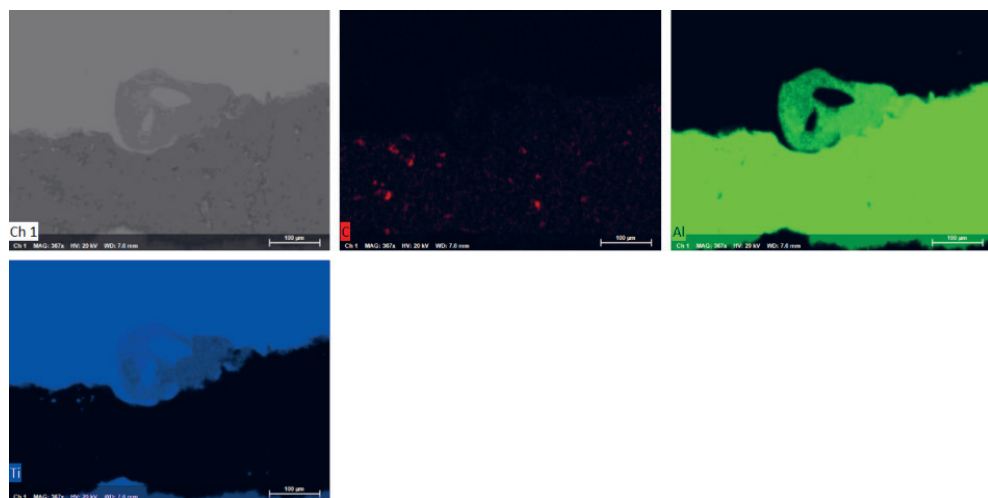
Rys. 18. Rozkład powierzchniowy pierwiastków w złączy żelazo armco – tytan Gr. 1

Zawartość poszczególnych pierwiastków została przedstawiona w tabeli 7.

Tabela 7. Zawartość pierwiastków w złączy żelazo armco – tytan Gr. 1

Pierwiastek	Masa norm. [%]	Masa atom. [%]	Błąd bezwzględny [%] (1 sigma)	Błąd względny [%] (1 sigma)
Żelazo	51,56	41,95	0,53	1,05
Tytan	44,18	41,92	0,48	1,11
Węgiel	4,26	16,13	0,22	5,33
Suma				
	100	100		

Badanie to powtórzono również dla złącza stopu Al 1050 z tytanem Gr. 1, wyniki przedstawiono na rysunku 19.



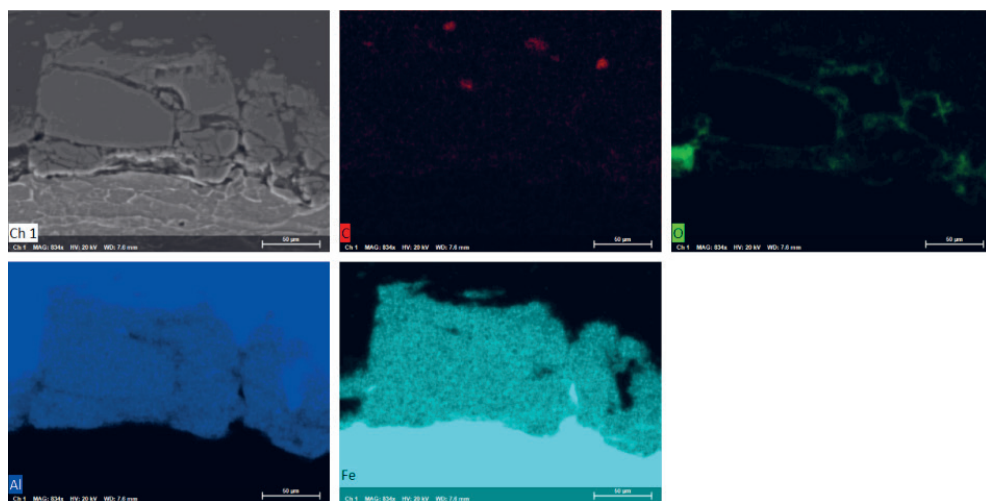
Rys. 19. Rozkład powierzchniowy pierwiastków w złączy stop Al 1050 – tytan Gr. 1

Zawartość poszczególnych pierwiastków została przedstawiona w tabeli 8.

Tabela 8. Zawartość pierwiastków w złączy stop Al 1050 – tytan Gr. 1

Pierwiastek	Masa norm. [%]	Masa atom. [%]	Błąd bezwzględny [%] (1 sigma)	Błąd względny [%] (1 sigma)
Tytan	48,21	31,06	0,59	1,09
Aluminium	44,97	51,42	1,52	3,01
Węgiel	6,82	17,52	0,42	5,47
Suma				
	100	100		

Najistotniejsza była analiza składu chemicznego złącza żelaza armco z tytanem Gr. 1, ponieważ to w tym złączy doszło do rozwarstwienia. Wyniki analizy przedstawiono na rysunku 20.



Rys. 20. Rozkład powierzchniowy pierwiastków w złączy żelazo armco – stop Al 1050

Zawartość poszczególnych pierwiastków została przedstawiona w tabeli 9.

Tabela 9. Zawartość pierwiastków w złączy żelazo armco – stop Al 1050

Pierwiastek	Masa norm. [%]	Masa atom. [%]	Błąd (1 sigma)	Błąd względny [%] (1 sigma)
Aluminium	45,22	51,16	1,39	2,98
Żelazo	44,65	24,41	0,42	0,92
Węgiel	8,03	20,40	0,45	5,46
Tlen	2,11	4,03	0,11	4,96
Suma				
	100	100		

Wyniki badania, ich analiza, a także wykres dwufazowy Fe-Al pozwoliły stwierdzić, że w trakcie wymieszania tych dwóch materiałów dochodzi do powstania faz kruchych. Analiza składu chemicznego ujawniła dodatkowo obecność tlenków, które również są fazami kruchymi.

6. ZASTOSOWANIE WYTWORZONEGO MATERIAŁU

Opisany w artykule materiał, po zakończeniu prac badawczo-rozwojowych i osiągnięciu założonych właściwości, może znaleźć szerokie zastosowanie w budowie konstrukcji o specjalnym przeznaczeniu. Jest to jednocześnie materiał relatywnie lekki, a celowe zwiększenie w jego ogólnej masie udziału metali lekkich i praca nad technologiami obróbki materiału, których efektem będzie nadanie mu cech kompozytu o silnie gradientowej strukturze właściwości, zdecydowanie rozszerzy obszar zastosowań.

7. PODSUMOWANIE

Przeprowadzone badania dostarczyły cennych informacji na temat wpływu procesu platerowania i walcowania na materiały takie jak żelazo armco, tytan Gr. 1 i stop Al 1050. Ponadto pozwoliły one ocenić jakość wykonanego dziesięciowarstwowego metalicznego kompozytu. Badania mikrostruktury wykazały, że doszło do delaminacji między aluminium i żelazem. Wcześniej wykonywane badania okiem nieuzbrojonym nie wykazały tej wady. Następnie analiza składu chemicznego wykazała, że w wyniku podgrzewania w procesie walcowania dochodzi do powstania kruchych związków międzymetalicznych w miejscu wymieszania poszczególnych warstw. Trwają dalsze prace badawcze nad rozwiązaniem powstałych problemów, a także nad dalszym rozwojem wykorzystania wytworzonego dziesięciowarstwowego plateru.

Podziękowania

Autorzy pracy składają podziękowania Panu prof. dr. hab. inż. Sebastianowi Mrozowi za wykonanie procesu walcowania wytworzonego plateru.

Praca zrealizowana w ramach współpracy AGH z firmą EXPLOMET Gałka, Szulc spółka komandytowa i zrealizowana w ramach prac statutowych AGH nr 16.16.110.663. Wykonana dzięki wsparciu badawczemu Międzynarodowego Centrum Mikroskopii Elektronowej dla Inżynierii Materiałowej IC-EM AGH.

LITERATURA

- [1] Dyja H., Maranda A., Trębiński R., *Technologie wybuchowe w inżynierii materiałowej*, Wydawnictwo Wydziału Metalurgii i Inżynierii Materiałowej Politechniki Częstochowskiej, Częstochowa 2001.
- [2] Gałka A., *Zastosowanie technologii wybuchowego platerowania metali do wytwarzania nowych zaawansowanych materiałów warstwowych na przykładzie połączenia tytan Ti6Al4V – aluminium AA2519*, Materiały Wysokoenergetyczne, t. 7, 2015, s. 73–79.
- [3] Walczak W., *Zgrzewanie wybuchowe metali i jego zastosowania*, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa 1989.
- [4] Zumbilev I.A., *About the influence of ion carbonitriding on the chemical composition of the carbonitride zone*, Journal of Food and Packaging Science, Technique and Technologies, vol. 5, no. 8, 2016, s. 10–13, <https://jfpstt.com/wp-content/uploads/2020/12/Number-8-JoFPSTT.pdf#page=12> [dostęp: 10.02.2024].

- [5] Esmacili A., Zareie Rajani H.R., Sharbati M., Besharati Givi M.K., Shamanian M., *The role of rotation speed on intermetallic compounds formation and mechanical behavior of friction stir welded brass/aluminum 1050 couple*, Intermetallics, vol. 19, iss. 11, 2011, s. 1711–1719, <https://doi.org/10.1016/j.intermet.2011.07.006>.
- [6] Prażmowski M., Najwer M., Paul H., Andrzejewski D., *Influence of explosive welding parameters on properties of bimetal Ti-carbon steel*, MATEC Web of Conferences, vol. 94, 2017, 02012, <https://doi.org/10.1051/mateconf/20179402012>.
- [7] Emetal, *Aluminium niestopowe gatunek AW-1050A*, https://emetal.eu/aluminium/aluminium-EN-AW-1050A-ISO_-A199,5-EN_-AW-A199,5-PN_-A1-DIN_-A199,5-wnr_-3.0255/ [dostęp: 10.02.2024].
- [8] Hempel Metals, *Ti Gr 1 / 3.7025*, <https://www.hempel-metals.pl/pl/gatunki/stopy-tytanu/grade-1-37025/> [dostęp: 10.02.2024]
- [9] Fronczek D.M., Wojewoda-Budka J., Chulist R., Sypien A., Korneva A., Szulc Z., Schell N., Zięba P., *Structural properties of Ti/Al clads manufactured by explosive welding and annealing*, Materials and Design, vol. 91, 2016, s. 80–89, <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2015.11.087>.
- [10] Pocica N., Tuz L., *Ocena mikrostruktury i wybranych własności mechanicznych złączy zgrzewanych wybuchowo po obróbce cieplnej*, Przegląd Spawalnictwa, R. 88, nr 4, 2016, s. 35–38.
- [11] Osuch W., *Bliźniaki przemiany w stalach niskowęglowych*, Wydawnictwa AGH, Kraków 2010.

Konrad Lukaj*, Karolina Kucharz*

INTERAKTYWNY MODEL FOTOGRAMETRYCZNY JAKO NOWOCZESNE NARZĘDZIE WSPOMAGAJĄCE INTEGRACJĘ, INTERPRETACJĘ I PREZENTACJĘ DANYCH GEOLOGICZNYCH NA PRZYKŁADZIE KAMIENIOŁOMU „DROBNY”

W ramach projektu LiSEARCH interdyscyplinarnym badaniom poddano sekwencję warstw lgockich odsłaniającą się w jednostce śląskiej Karpat zewnętrznych w kamieniołomie „Drobny” w Huczwicach. Za pomocą bezzałogowego statku powietrznego wykonano serię zdjęć, które przekształcono w wysoko rozdzielczy model fotogrametryczny odsłonięcia. Przygotowano charakterystyki opisowe reprezentatywnych ławic, interpretację strukturalną oraz opróbowania 12 warstw przez 76 pomiarów składu pierwiastkowego (zwłaszcza pod kątem mineralizacji arsenowej oraz pierwiastków krytycznych), a także analizę SEM oraz XRD na wybranych próbkach. Geowizualizacja i integracja zebranych danych umożliwiła bezpośredni wgląd w strukturę odsłonięcia, precyzyjne wytyczenie przebiegu stref dyslokacji tektonicznych, przestrzenną korelację warstw (w tym tych wyróżniających się kolorystycznie) i prezentację rezultatów opróbowania. Wyniki badań wskazują, że związki arsenu nie mają wpływu na czerwone zabarwienie skał w kamieniołomie.

INTERACTIVE PHOTOGRAMMETRIC MODEL AS A MODERN TOOL TO SUPPORT THE INTEGRATION, INTERPRETATION AND PRESENTATION OF GEOLOGICAL DATA

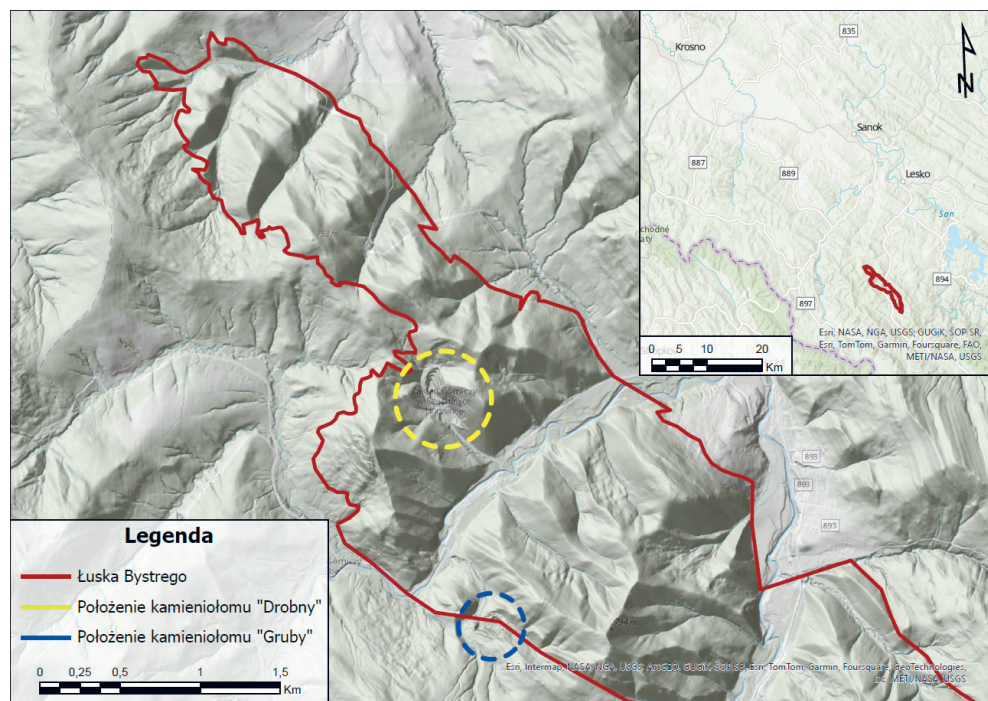
Within the LiSEARCH project, the Lgota Formation beds in the Silesian Unit of the Outer Carpathians at “Drobny” quarry in Huczvice were studied. Using a UAV, a series of photos was taken and used to create a high-resolution 3D model of the exposure. Structural measurements and descriptive characterization of representative shoals were conducted. Twelve layers were sampled, with 76 measurements taken of elemental composition, focusing on arsenic compounds and critical elements. SEM and XRD analyses were performed on selected samples. Geovisualization of the data enabled detailed insight into the quarry’s structure, precise delineation of tectonic dislocation zones, spatial differentiation and correlation of layers, including those distinguished by color, and presentation of sampling results. It was concluded that arsenic compounds do not affect the red pigmentation of the rocks.

* AGH Akademia Górniczo-Hutnicza, Wydział Geologii, Geofizyki i Ochrony Środowiska, Studenckie Koło Naukowe Kartografii Geologicznej i Komputerowej „Azymut”.

1. WPROWADZENIE I CEL BADAŃ

Podczas rozwiązywania problemu badawczego korzyści może przynieść wieloaspektowe podejście, ponieważ może być on uzależniony od wielu zmiennych. Jest ono przydatne, w szczególności gdy otoczenie jest złożone i skomplikowane, gdyż wyciąganie wniosków wyłącznie na podstawie jednej metody lub punktowo może prowadzić popełniania błędów. Niesie to za sobą konieczność integracji, czyli połączenia cząstkowych efektów w celu stworzenia wielokierunkowej charakterystyki danego zagadnienia i prezentacji wyników. Dostępność wszystkich rezultatów w jednym miejscu i kontekst lokalizacyjny pomagają wyciągać ostateczne wnioski. Możliwe jest także podzielenie się efektami prac, tak aby każdy mógł samodzielnie dokonać ich interpretacji.

Kamieniołom „Drobny” jest położony w Bieszczadach, w powiecie leskim, na południowy zachód od Baligrodu. Geologicznie jest to obszar tzw. łuski Bystrego – elementu tektonicznego o złożonej budowie stanowiącego część strefy przeddukielskiej płaszczowiny śląskiej [1]. Łuska zajmuje powierzchnię około 15 km². Jej obszar wyróżnia się topograficznie – budujące go wzgórza mają nachylenia stoków dochodzące do 40–50°, charakterystyczne jest także występowanie głęboko wciętych V-kształtnych dolin rzecznych o prostym przebiegu (rys. 1).



Rys. 1. Mapa lokalizacyjna z zaznaczonym obszarem łuski Bystrego oraz kamieniołomem „Drobny” w Huczwicach.
Opisywane odsłonięcie stanowi północną część odkrywki

Ta specyficzna rzeźba jest spowodowana znacznym zaangażowaniem tektonicznym oraz większą odpornością na erozję występujących tu silnie zlityfikowanych skał. Przejawem procesów związanych z tektoniką jest występowanie mineralizacji arsenowej w postaci kryształów realgaru w pobliżu stref uskokowych w warstwach istebniańskich oraz na spękaniach ciosowych w warstwach lgockich [2]. Doniesienia o występowaniu szczególnego rodzaju mineralnych wód litowo-arsenowych [3] były motywacją do przeprowadzenia badań w ramach projektu LiSEARCH realizowanego przez SKN „Azymut”. Jego celem było zbadanie potencjalnych wystąpień litu, a także arsenu i innych pierwiastków ważnych dla procesu transformacji energetycznej w łusce. Zwróciliśmy uwagę na genezę wspomnianej wcześniej mineralizacji i ewentualnych wzbogaceń w pierwiastki wód mineralnych.

Jednym z elementów projektu była analiza strukturalna obszaru łuski [4]. Wykonana została za pomocą tradycyjnych, terenowych pomiarów kartograficznych z użyciem kompasu geologicznego, analizy numerycznego modelu terenu oraz modeli fotogrametrycznych odsłonięć skalnych (DOM – *digital outcrop model*) [5]. Trójwymiarowe modele odsłonięć wykonano w kamieniołomach „Gruby” w Rabem i „Drobny” Huczwicach. Ten ostatni okazał się szczególnie interesujący ze względu na swój duży rozmiar (150 m długości i 50 m wysokości) oraz przykuwające uwagę intensywnie czerwone zabarwienie niektórych warstw skalnych w odsłonięciu. Po pobraniu próbek okazało się, że za barwę skał odpowiada nalot nagromadzony głównie na płaszczyznach ciosowych piaskowców w warstwach lgockich (rys. 2). Opisywana w literaturze mineralizacja arsenowa [2, 6–8], na którą składają się jaskrawoczerwone lub pomarańczowe minerały takie jak realgar i aurypigment, była przyczynkiem do wysnucia hipotezy, że za czerwoną barwę mogą odpowiadać związki arsenu. Jednocześnie tylko niektóre ławice wyróżniały się kolorystycznie w całej swojej rozciągłości.



Rys. 2. Próbką piaskowca pobrana w kamieniołomie „Drobny” w Huczwicach z widocznym czerwonym nalotem na powierzchni (fot. J. Szydlowski, SKN „Azymut”)

Zdjęcia wykonano za pomocą bezzałogowego statku powietrznego (UAV – *unmanned aerial vehicle*). W kamieniołomie przeprowadzono także prace geochemiczne – pomiary spektrometrem XRF pozwoliły na przybliżone określenie zawartości pierwiastków (cięższych od Mg) w skałach. Działania te miały na celu zebranie jak najpełniejszych informacji o odkrywce, umożliwiających wyciągnięcie wniosków na temat budowy geologicznej warstw lgockich w łusce Bystrego, w szczególności ich charakterystycznej, miejscami rdzawoczerwonej barwy.

2. BUDOWA GEOLOGICZNA OBSZARU BADAŃ

Fliszem karpackim nazywamy przeławicające się w różnym stopniu piaskowce i łupki. Są to miększe serie osadów głębokomorskich powstałe w wyniku wpływów grawitacyjnych, między innymi prądów zawieszinowych. Współcześnie, po procesach diagenetycznych i kompaktacji, ich miąższość w jednostce śląskiej osiąga 6000 m.

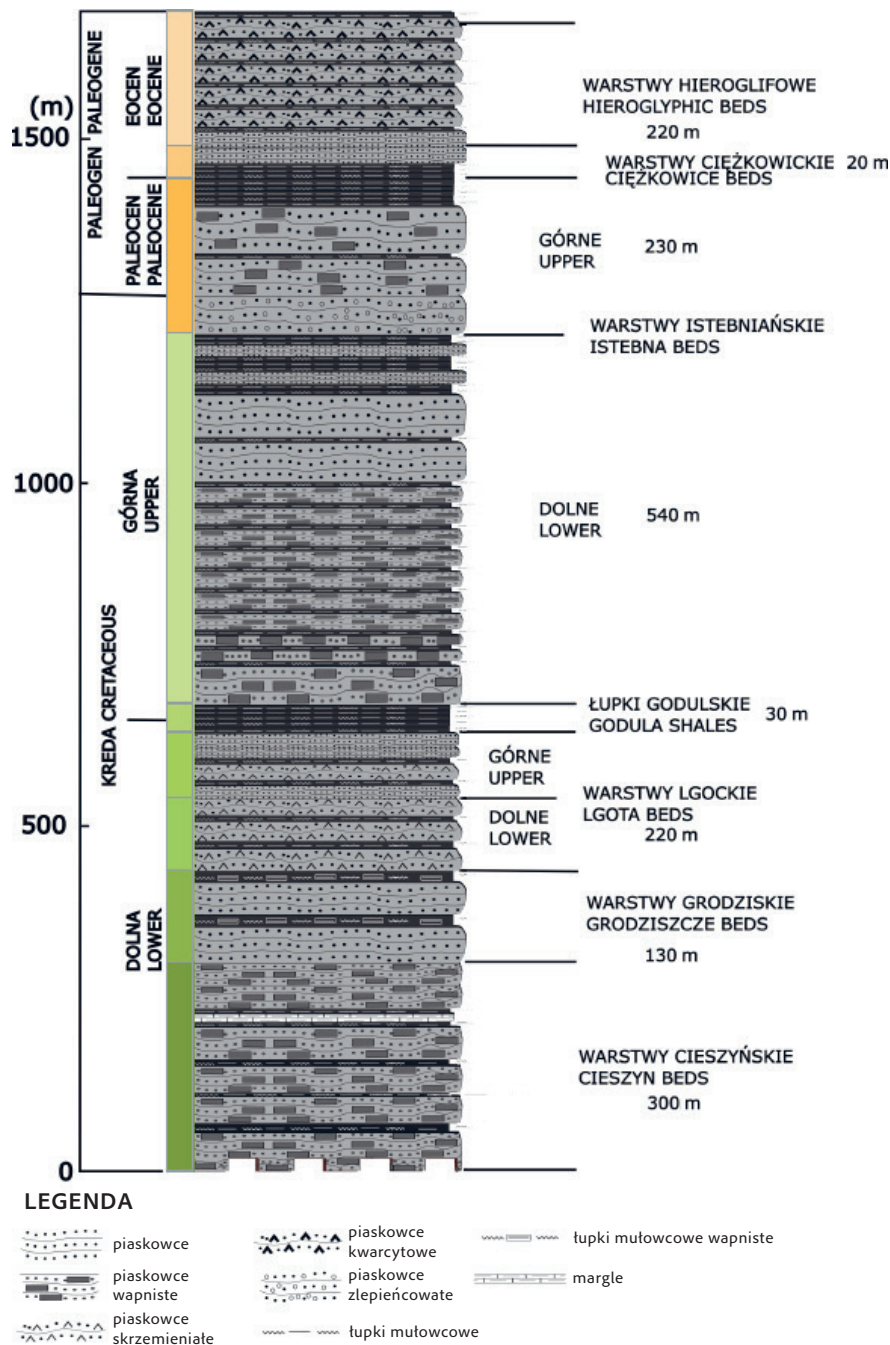
W profilu łuski Bystrego występują utwory fliszowe wieku od kredy do paleogenu. Są to kolejno (od najstarszych) warstwy cieszyńskie, grodziskie, lgockie, łupki godulskie, warstwy istebniańskie, ciężkowickie i hieroglifowe oraz menilitowe (rys. 3).

Kamieniołom „Drobny” w Huczwicach jest założony w warstwach lgockich dolnych i górnych, a w szczycie występują także warstwy grodziskie. Odkrywka po południowej stronie sięga łupków godulskich, co oznacza, że w kamieniołomie odsłania się pełny profil warstw lgockich [9].

Warstwy lgockie to seria naprzemianległych pakietów piaskowców średnio- i cienkoławicowych z pojedynczymi grubymi warstwami miąższości nawet do kilku metrów. Kwarcytowe, ciemne na świeżym przełamie, niekiedy krzemionkowe piaskowce poprzedzielane są pakietami czarnych łupków. Wyróżniamy warstwy lgockie dolne i górne.

Jako pierwsze zostały zdeponowane warstwy lgockie dolne, ale w kamieniołomie są położone ponad warstwami lgockimi górnymi, ze względu na odwrócone zaleganie. Przeważnie gruboławicowe piaskowce poprzedzielane czarnymi łupkami tworzą serię o miąższości około 90 m [10]. Skała na przełamie jest błyszcząca. Często występuje frakcjonowanie. Dominuje kwarc, podrzędnie występują skaleni, okruchy łupków, glaukonit oraz piryty, który prawdopodobnie powstał na etapie wczesnej diagenety [2]. Ślącza [10] wspomina, że łupki pokrywają się czerwonymi, żółtawymi i pomarańczowymi nalotami, nie precyzując jednocześnie ich składu mineralnego. Współcześnie zaobserwowano, że czerwone i pomarańczowe naloty występują głównie w obrębie ławic piaskowców.

Warstwy lgockie górne są serią o miąższości około 80 m. Tworzą ją (dominujące w tym wydzielaniu) czarne łupki oraz cienko- i średnioławicowe piaskowce kwarcytowe o nieco jaśniejszym odcieniu. Spotyka się ziarna mik, skaleni oraz glaukonit. Podrzędnie występuje piryty. Łupki są czarne, niekiedy brunatne [10]. Tu również występują naloty na powierzchni zwietrzałych ścian (żółte i czerwone). Warstwy lgockie w łusce Bystrego wyraźnie różnią się litologicznie od tych spotykanych w innych częściach Karpat zewnętrznych [10].



Występowanie realgaru i aurypigmentu (minerałów arsenu) stwierdzono w łusce w warstwach istebniańskich, Igockich oraz hieroglifowych. Realgar występuje w postaci jasnoczerwonych, dobrze wykształconych kryształów w spękaniach, głównie w pobliżu stref uskoko- wych. Często towarzyszy mu zielonkawa masa ilasta o charakterystycznym zapachu (rys. 4). W kamieniołomach na powierzchniach piaskowców i łupków obficie występują też pylaste naskorupienia oraz naloty i polewy oraz drobne żyłki tnące kompleksy łupkowe [2].



Rys. 4. Kryształy realgaru w masie ilastej. Odsłonięcie zlokalizowane poza kamieniołomem, w warstwach istebniańskich, w pobliżu źródła „Anna” w dolinie Rabskiego Potoku (fot. J. Szydłowski)

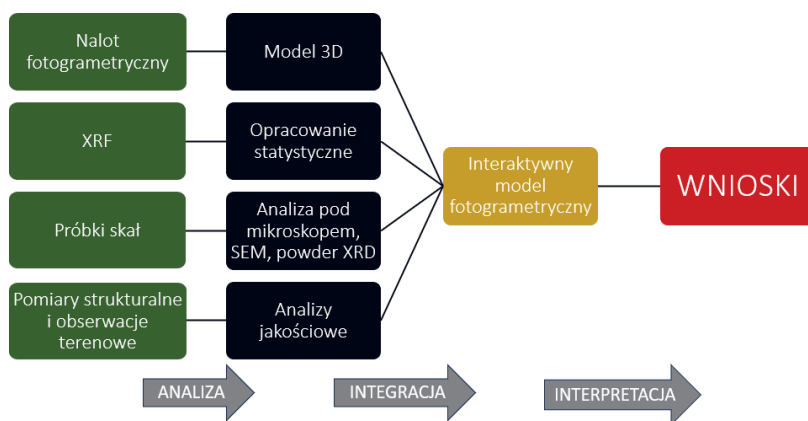
Aurypigment występuje na powierzchni czarnych łupków i piaskowców jako pylaste, zbite naloty i naskorupienia na skałach w kamieniołomach barwy cytrynowożółtej i pomarańczowej [2].

W kamieniołomach w dolinie Rabskiego Potoku mineralizacja realgarem i aurypigmentem rozwinęła się na powierzchniach spękań ciosowych. Według Rybak [2] mineralizacja arsenowa w kamieniołomie „Drobny” jest związana ze spękaniem o biegu 40–45°, gdzie współtowarzyszy wystąpieniom bipiramidalnych kryształów kwarcu – diamentom marmaroskim. Prawdopodobnie była ona wynikiem migracji roztworów hydrotermalnych mających źródło w intruzji położonej około 35 km na południowy zachód, po stronie słowackiej [7].

W obszarze łuski Bystrego (np. w korycie potoku Jabłonka) spotykane są pseudomorfozy getytu po pirycie, przybierające wiśniowe barwy [10].

3. METODYKA

W celu trójwymiarowej wizualizacji ścian kamieniołomu wykonano model fotogrametryczny odsłonięcia, do którego dowiązano wyniki uzyskane dzięki innym badaniom przeprowadzonym w ramach projektu. Obejmowały one badania geochemiczne – spektrometrię XRF, dyfraktometrię XRD, SEM EDS oraz badania mikroskopowe na płytkach cienkich i pomiary kompasem geologicznym (rys. 5).



Rys. 5. Schemat metodyki badań

Pierwszym elementem badań był nalot fotogrametryczny z wykorzystaniem bezzałogowego statku powietrznego DJI Mavic 3 (rys. 6). Naloty zostały wykonane na podstawie planu opartego na modelu wysokościowym udostępnionym w usłudze Google Earth Pro oraz za pomocą sterowania manualnego. Z uwagi na trwającą eksploatację nalot sterowany manualnie zapewnił dużo lepszą rozdzielczość i równomierny stopień pokrycia. Wszystkie zdjęcia zostały wykonane w przybliżeniu prostopadłe do fotografowanej ściany i w tych samych warunkach oświetleniowych. Takie ustawienie UAV względem ścian odkrywki sprzyja uzyskaniu stałego pokrycia i dobrej jakości modelu [12]. Wykonano ponad 500 fotografii obejmujących północną część kamieniołomu „Drobny”, poddaną obecnie najbardziej intensywniej eksploatacji. Stopień wzajemnego pokrycia poziomego i pionowego zdjęć wynosił minimum 60%.

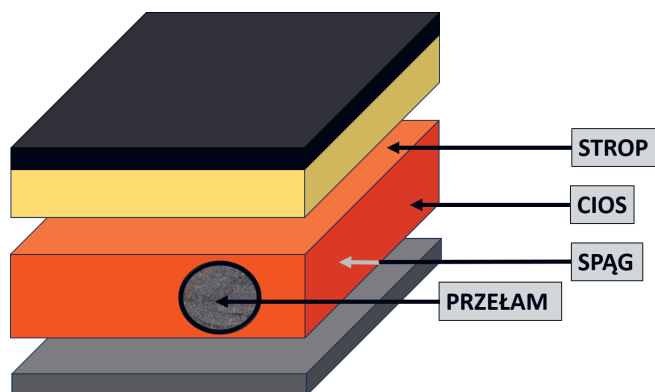
Po powrocie z prac terenowych przystąpiono do konstrukcji modelu fotogrametrycznego odsłonięcia (DOM). Procedurę rozpoczęto od eliminacji niektórych zdjęć, na których widoczny był głównie obszar poza odkrywką, rumosz skalny lub ludzie. Ostatecznie do stworzenia modelu w programie 3DSurvey wykorzystano 412 fotografii. Za pomocą algorytmu SFM (*structure from motion*) pozwalającego na znalezienie wspólnych, charakterystycznych elementów na wczytanych zdjęciach [13] i ich umiejscowienie w trójwymiarowej przestrzeni stworzono chmurę punktów. Ta została poddana rekonstrukcji pozwalającej stworzyć gęstą chmurę punktów (*dense point cloud*). Bazując na niej, obliczono model w formie siatki wieloboków, który wraz z dopasowanymi teksturami stał się ostatecznym, możliwym do interpretacji modelem fotogrametrycznym (MESH odsłonięcia).



Rys. 6. Bezzałogowy statek powietrzny wykorzystany do badań – DJI Mavic 3 (fot. K. Kucharz)

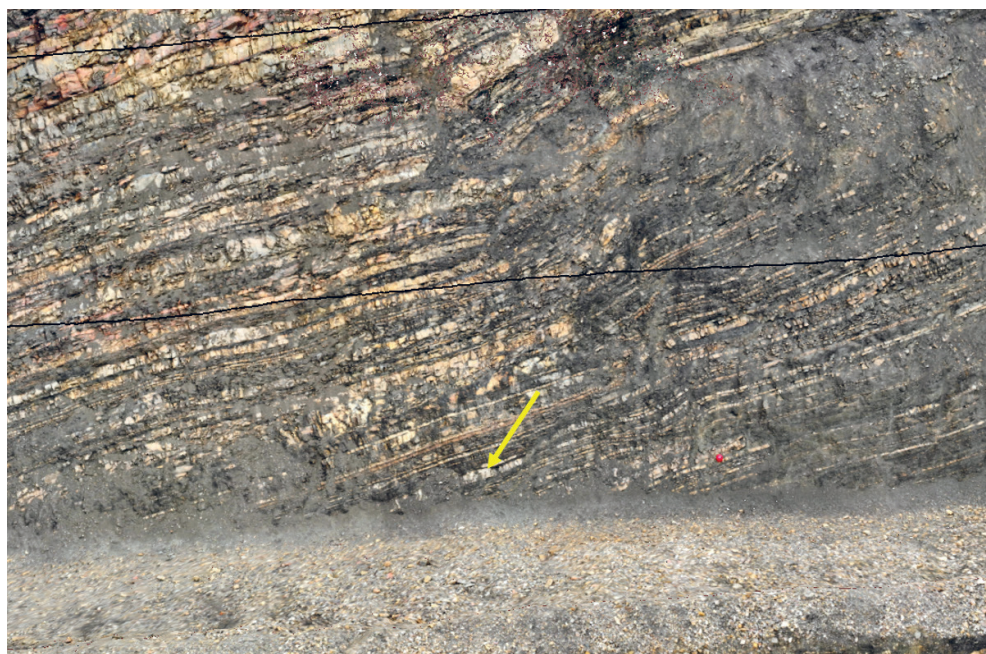
W ramach prac terenowych w kamieniołomie przeprowadzono także pomiary geochemiczne spektrometrem fluorescencji rentgenowskiej XRF (Skyray Genius 5000). Pozwoliły one na przybliżone określenie zawartości pierwiastków (cięższych od Mg) w skałach. Zbadano świeży przełam, cios i powierzchnię stropu lub spągu w obrębie 12 warstw, opisując na bieżąco także parametry ich zapadania oraz orientację spękań ciosowych (rys. 7). Pomiary spektrometrem XRF wykonano dwukrotnie (łącznie 76 pomiarów), a następnie uśredniono. Dzięki nim oznaczono procentową zawartość 32 pierwiastków, w tym między innymi dominujących Ca, Fe, K oraz pierwiastków z grupy arsenu (Cu, Zn, As, Sb, Nb, Pb, Sr, Hg). Na tej podstawie wyznaczono trendy rozkładu pierwiastków w obrębie odsłonięcia, które zamieszczono w kartach poszczególnych punktów. Dzięki tym wynikom wskazano próbki najbardziej wyróżniające się spośród pozostałych pod względem geochemicznym, predysponowane do przeprowadzenia na nich dalszych analiz.

Badania laboratoryjne objęły wykonanie preparatów mikroskopowych (tzw. płytek cienkich) oraz ich opis pod mikroskopem optycznym. Na podstawie tych badań oraz wcześniejszych pomiarów spektrometrycznych do dalszych analiz wytypowano próbki HR_0405, HR_0408 i HR_0410, przy czym pierwszą przebadano metodą SEM EDS, z drugiej pobrano wierzchni nalot i poddano go analizom dyfraktometrem XRD, a trzecią zbadano oboma tymi metodami. Dyfraktometr XRD pozwala na określenie składu mineralnego sproszkowanego materiału dzięki analizie odbitych od sieci krystalicznej fal rentgenowskich. Umożliwia zidentyfikowanie występowania poszczególnych minerałów, a także ograniczoną analizę ilościową na zasadzie porównania próbek.

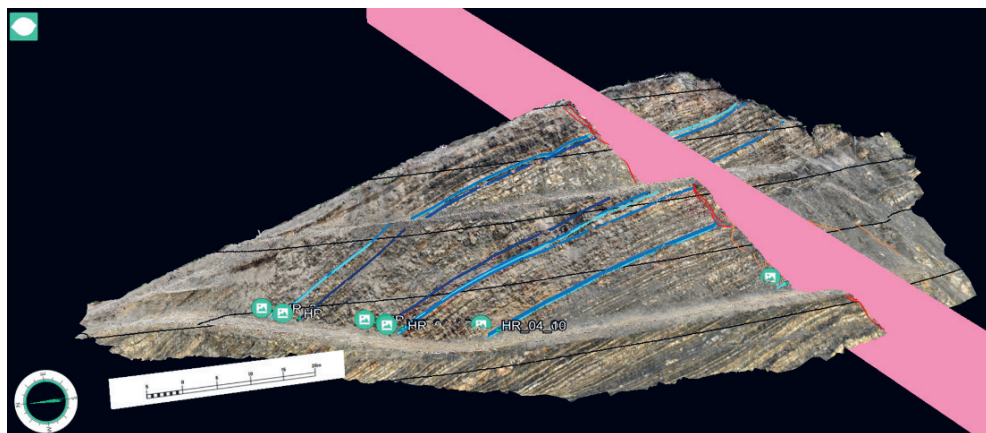


Rys. 7. Lokalizacja warstw badanych za pomocą przenośnego spektrometru XRF powierzchni

Trójwymiarowy model został następnie przeanalizowany z wykorzystaniem oprogramowania LIME. Za jego pomocą dokonano analiz strukturalnych i sedimentologicznych, wskazując przebieg dyslokacji tektonicznych oraz kanały depozycyjne w obrębie odsłonięcia (rys. 8). Wyróżniając wizualnie badane warstwy, w miejscach pobrania próbek i wykonanych pomiarów stworzono interaktywne punkty, które zawierają kompleksowe dane na temat danej próbki skalnej, w tym wyniki przeprowadzonych różnymi metodami badań geochemicznych (rys. 9 i 10).

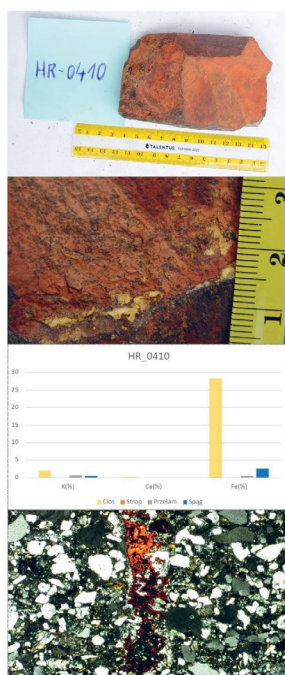


Rys. 8. Kanał dyspozycyjny w obrębie odsłonięcia



Rys. 9. Model odsłonięcia wraz z naniesionymi interaktywnymi punktami informacyjnymi. Zinterpretowany przebieg uskoku jest symbolizowany przez różową płaszczyznę przebiegającą w poprzek odsłonięcia. Niebieskie linie ukazują przebieg próbowanych ławic w zależności od procentowej zawartości żelaza na płaszczyznach ciosowych zmierzonej za pomocą spektrometru XRD

HR_0410



Miejsce poboru:

Czwarty poziom kamieniołomu "Drobny" w Huczwicach w powiecie Ięskim, w gminie Bałgród.

Data poboru:

25 czerwca 2023 r.

Charakterystyka:

Piaskowiec na zwiertzałej powierzchni czarny, ewidentnie silnie mikowy, głównie muskowitowy. Występują żółtawe ziarna skaleni, na trzech prostopadłych do siebie powierzchniach występują czerwono-wiśniowo-brązowożółte naloty

Miejsca pomiarów XRF:

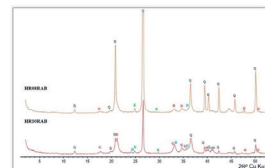
cios, przełam, spag

Opis składu pierwiastkowego:

Cios: Największa zawartość Fe (28,2%) na tle reszty próbek pobranych w kamieniołomie. Wysoka zawartość K (1,93%) oraz Zn (0,36%).

Przełam: Wysoka zawartość Sr (0,13%) oraz Nb (0,013%).

Spag: Brak szczególnie wyróżniających się zawartości pierwiastków.



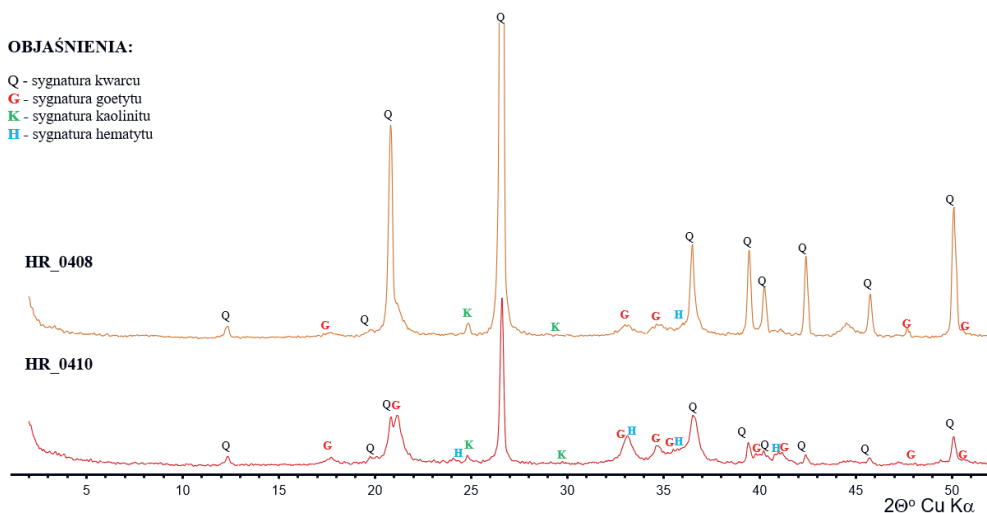
Opracowanie: Karolina Kucharz, Konrad Lukaj, Jakub Andrzejak, Zbigniew Ziarek, Jan Sztydlowski, Hanna Edelmüller, Weronika Cyran

Rys. 10. Karta próbki HR_0410 zawierająca przekrojowe informacje na temat badanej skały

4. WYNIKI

Rezultatem prac jest model fotogrametryczny północnej części kamieniołomu „Drobny” z elementami interaktywnymi. Przy dużych rozmiarach całego odsłonięcia wykonanie zdjęć za pomocą bezzałogowego statku powietrznego i ich późniejsze przekształcenie w model fotogrametryczny znacznie ułatwiło prześledzenie przebiegu poszczególnych warstw skalnych, nawet o niewielkiej miąższości, oraz umożliwiło wyznaczenie przebiegu dyslokacji tektonicznych.

Dzięki analizie modelu fotogrametrycznego stwierdzono, że barwa jest związana z konkretnymi ławicami na całej ich długości. Do analiz dyfraktometrycznych wybrano próbki piaskowca różniące się barwą osadu. Pokrywający próbkę HR_0408 osad ma barwę żółtawo-rudą, a w przypadku próbki HR_0410 – czerwonawą, bardziej jaskrawą i wyróżniającą się z daleka. Analiza wykonana za pomocą dyfraktometrii *powder XRD* wskazuje, że osady te mają podobny skład – zawierają goethyt, hematyt i kaolinit oraz kwarc (rys. 11).

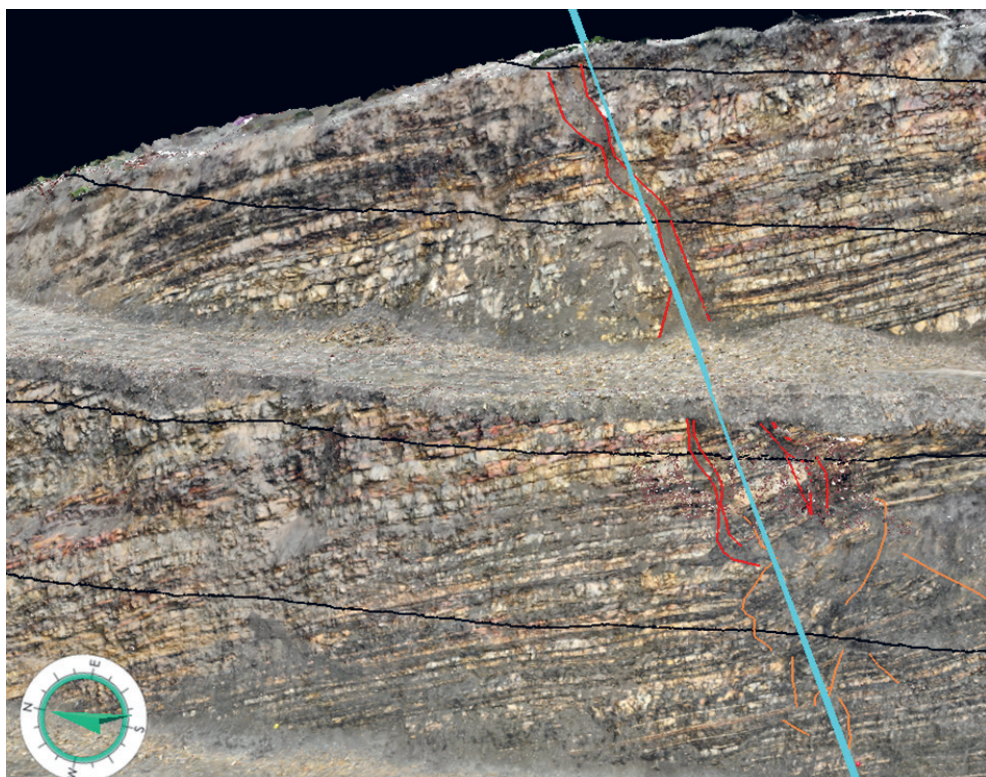


Rys. 11. Wyniki analizy XRD. Obie badane próbki osadu składały się z kwarcu, goetytu, kaolinitu i hematytu, przy czym w próbka HR_0410 cechująca się wyrazistszą, czerwoną barwą zawierała procentowo mniej kwarcu, a więcej minerałów żelaza nadających jej barwę

Ten ostatni to najprawdopodobniej fragmenty litego piaskowca, które dostały się do próbki w procesie jej zdzierania z powierzchni. Probka HR_0410 zawiera więcej goetytu i hematytu, co prawdopodobnie przekłada się na większą intensywność barwy nalotu. W pomiarach przeprowadzonych w terenie za pomocą przenośnego spektrometru próbka HR_0410 cechowała się znacznie wyższymi zawartościami (nawet 30%) żelaza niż HR_0408. Badania przeprowadzone za pomocą dyfraktometru XRD nie potwierdziły występowania związków arsenu w żadnej z próbek, a spektrometria XRF wykazała ich śladowe ilości, które jednak nie korelowały z intensywnością czerwonego zabarwienia nalotu na skałach. Również badania mikroskopowe ujawniły występowanie tlenków i wodorotlenków żelaza, nie ukazując jednocześnie minerałów arsenu. W osadzie mogą występować śladowe ilości zaabsorbowanego

arsenu, ale nie ma on decydującego wpływu na barwę – odpowiadają za nią prawdopodobnie związki żelaza powstające współcześnie w pobliżu powierzchni z innych minerałów żelaza, np. pirytu, którego występowanie opisywano w literaturze [2]. W trakcie badań mikroskopowych także potwierdzono występowanie pirytu w piaskowcach Igockich pobranych w kamieniołomie [14]. Ustalenie, dlaczego w niektórych ławicach występuje więcej hematytu w osadzie, wymaga przeprowadzenia badań uzupełniających.

Model fotogrametryczny może służyć także do wyznaczania przebiegu dyslokacji tektonicznych, zwłaszcza dużej skali i przebiegających przez utwory o dużej plastyczności, jak np. łupki. Wykorzystano to do wyznaczenia parametrów dużej strefy dyslokacyjnej przebiegającej przez ścianę odkrywki, określając zarówno jej bieg, jak i przybliżony kąt upadu: 227/106 (47/74 w zapisie RHR) (rys. 12). Są one tożsame z parametrami uskoku ukazanego na mapie tektonicznej [15]. Narzędzie to pozwala na osiągnięcie bardzo wiarygodnych rezultatów i kompleksową analizę dyslokacji na długim odcinku.



Rys. 12. Przebieg uskoku przecinającego odsłonięcie zinterpretowany na *digital outcrop model*

Dodatkowym atutem zastosowania interaktywnego modelu jest możliwość manipulacji wyświetlanym obrazem, w tym przybliżania, zmieniania kąta obserwacji oraz odwrócenia całego modelu do układu normalnego z czasów jego depozycji.

Proces zbierania danych wejściowych oraz późniejszego tworzenia i analizowania modelu był okazją do cennych obserwacji, pozwalających zoptymalizować proces ich akwizycji i późniejszego opracowania¹. Zaplanowanie misji z wykorzystaniem wysokościowego modelu terenu nie pozwoliło na zachowanie stałej, optymalnej odległości od ściany, co skorygowano przez wykonanie nalotu fotogrametrycznego ze sterowaniem manualnym. Kolejne badania odkrywek warto zdaniem autorów prowadzić albo manualnie, albo na podstawie uzyskanego za pomocą wstępnego nalotu modelu wysokościowego.

5. WNIOSKI

Na podstawie stworzonego modelu można było stwierdzić, że czerwona barwa ścian kamieniołomu „Drobny” w Huczwicach występuje w obrębie pojedynczych ławic lub kilku ławic piaszczystych i łupków sąsiadujących ze sobą. Za ich barwę odpowiada nalot wypełniający spękania, a jej intensywność jest zależna od zawartości minerałów powstających w procesie wietrzenia związków żelaza, tj. goethytu i hematytu, i nie ma związku z występowaniem związków arsenu. W trakcie tworzenia misji fotogrametrycznej okazało się, że lepszy efekt niż wcześniejszy plan misji zapewni nalot prowadzony manualnie. Powstały model fotogrametryczny okazał się użytecznym narzędziem do wyznaczania przebiegu dyslokacji tektonicznych i pozwolił na potwierdzenie przebiegu uskoku uwzględnionego na mapach tektonicznych w literaturze obejmującej obszar analizowanej odkrywki. Dodatkowo stał się on podstawą do przestrzennego dowiązywania uzyskanych wyników, co umożliwiło integrację wszystkich zebranych danych.

Podziękowania

Jako autorzy chcielibyśmy serdecznie podziękować za współpracę wszystkim studentom zaangażowanym w projekt LiSEARCH, w szczególności: Radosławowi Szczęchowi, Zbigniewowi Ziarkowi, Jakubowi Andrzejakowi, Marcie Esmund, Janowi Szydłowskiemu, Mikołajowi Pawlakowi i Aleksandrowi Saczce. Dziękujemy za pomoc merytoryczną dr. inż. Andrzejowi Świąderowi, dr. inż. Piotrowi Strzebońskiemu oraz prof. dr. hab. inż. Maciejowi Maneckiemu.

Badania i model zostały wykonane w ramach projektu LiSEARCH – „Szczegółowe rozpoznanie budowy strukturalnej łuski Bystrego w obszarze występowania anomalii geochemicznych, w celu identyfikacji potencjalnych złóż litu w Karpatach Zewnętrznych”, realizowanego jako wsparcie kół naukowych – IDUB 5859.

LITERATURA

- [1] Oszczytko N., Ślaczka A., Żytko K., *Regionalizacja tektoniczna Polski – Karpaty zewnętrzne i zapadlisko przedkarpackie*, Przegląd Geologiczny, vol. 56, nr 10, 2008, s. 927–935.

¹ Na podstawie wykonanych przez nas fotografii opiekun SKN „Azymut” dr inż. Andrzej Świąder wykonał w oprogramowaniu Drone2Map (Esri) animację przedstawiającą model z różnych perspektyw, która dostępna jest na kanale Koła w serwisie YouTube (<https://www.youtube.com/watch?reload=9&v=YM86ollqhts>).

- [2] Rybak B., *Związek mineralizacji kruszczowej z tektoniką łuski Bystrego (Bieszczady, Karpaty zewnętrzne)*, Przegląd Geologiczny, vol. 48, nr 11, 2000, s. 1023–1030.
- [3] Łach A., Pasztyła G., *Unikalne wody litowo-arsenowe w Rabe*, LAB. Laboratoria, Aparatura, Badania, r. 18, nr 6, 2013, s. 6–10.
- [4] Ziarek Z., Andrzejak J., Edelmüller H., *Wykorzystanie programów geoinformatycznych do analiz geoprzestrzennych na przykładzie łuski Bystrego (zewnętrzne Karpaty fliszowe)*, [w:] *Współczesne technologie geoinformacyjne w modelowaniu przestrzeni: I Kongres Geoinformacyjny: X Ogólnopolskie Sympozjum Geoinformacyjne: Kraków, 25–27 X 2023: Streszczenia referatów*, Polska Akademia Umiejętności – Komisja Geoinformatyki, Kraków 2023, s. 191–192.
- [5] Bistacchi A., Massironi M., Viseur S. (eds.), *3D Digital Geological Models. From Terrestrial Outcrops to Planetary Surfaces*, Wiley, Hoboken 2022.
- [6] Jaworski A., *Rtęć, arsen i pierwiastki grupy żelaza w utworach fliszowych kredy górnej i paleogenu łuski Bystrego koło Baligrodu*, Rocznik Polskiego Towarzystwa Geologicznego, vol. 49, nr 3–4, 1979, s. 379–394.
- [7] Nieć M., Radwanek-Bąk B., Lenik P., *Szkic metalogenii polskich Karpat – modele i możliwości występowania złóż rud*, Biuletyn Państwowego Instytutu Geologicznego, nr 467, 2016, s. 9–40.
- [8] Jarmołowicz-Szulc K., Kleczyński P., Kozłowski A., Gąsienica A., Giro L., *Przejawy mineralizacji w odniesieniu do procesów geotektonicznych w Karpatach fliszowych – nowe doniesienia*, Przegląd Geologiczny, vol. 71, nr 4, 2023, s. 188–196, <http://doi.org/10.7306/2023.13>.
- [9] Radwanek-Bąk B., *Śladami karpackich diamentów – i nie tylko – kamieniołomy „Rabe” i „Huczvice”*, Górnictwo Odkrywkowe, R. 50, nr 2–3, 2009, s. 149–153.
- [10] Ślącza A., *Stratygrafia serii łuski Bystrego na południe od Baligrodu*, Biuletyn Instytutu Geologicznego, nr 131, 1959, s. 203–250.
- [11] Andrzejak J., *Pomoce terenowe do wyjazdu terenowego w łusce Bystrego*, 2023 [niepublikowane].
- [12] Yang P., Esmaeili K., Goodfellow S., Ordóñez Calderón J.C., *Mine pit wall geological mapping using UAV-based RGB imaging and unsupervised learning*, Remote Sensing, vol. 15, iss. 6, 2023, 1641, <https://doi.org/10.3390/rs15061641>.
- [13] Tavani S., Granado P., Corradetti A., Girundo M., Iannace A., Arbués P., Muñoz J.A., Mazzoli S., *Building a virtual outcrop, extracting geological information from it, and sharing the results in Google Earth via OpenPlot nad Photoscan: An example from the Khaviz Anticline (Iran)*, Computers & Geosciences, vol. 63, 2014, s. 44–53, <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2013.10.013>.
- [14] Ziarek Z., Edelmüller H., Cyran W., Lukaj K., Kucharz K., *Czerwona mineralizacja ścian kamieniołomu Huczvice (projekt LiSEARCH – łuska Bystrego, Karpaty zewnętrzne)* [prezentacja podczas 64. Barbórkowej Konferencji Kół Naukowych AGH], 2023.
- [15] Mastella L., *Mapa tektoniczna jednostki przeddukielskiej (między Roztokami Dolnymi a Ustrzykami Górnymi)*, Projekt badawczy KBN nr 600999101, Archiwum Tektoniki i Kartografii Geologicznej Wydziału Geologii Uniwersytetu Warszawskiego, 1995 [niepublikowane].

Maria Migacz*

ANALIZA ZNAJOMOŚCI METODOLOGII I NARZĘDZI OPTYMALIZACYJNYCH WŚRÓD PRACOWNIKÓW – *CASE STUDY*

Analiza znajomości metodologii i narzędzi optymalizacyjnych wśród pracowników skupia się na zbadaniu wiedzy pracowników w danym przedsiębiorstwie na ten temat. Wynikiem końcowym jest wskazanie tych, które wydają się najbardziej adekwatne i skuteczne w kontekście danego środowiska biznesowego. Praca przedstawia wybrane metodologie i narzędzia optymalizacyjne, uzasadniając ich wybór i klasyfikując je. Dodatkowo dokonano krótkiej charakterystyki badanego przedsiębiorstwa. Na kolejnych etapach przeprowadzono analizę wyników ankietowych, wskazując ostatecznie najlepsze metodologie i narzędzia optymalizacyjne. W wyniku tego procesu jako najbardziej odpowiednia została wybrana metodologia *kaizen*, zaś za najlepiej dopasowane narzędzie optymalizacyjne uznano *just-in-time*.

THE ANALYSIS OF FAMILIARITY WITH OPTIMIZATION METHODOLOGIES AND TOOLS AMONG EMPLOYEES – CASE STUDY

The analysis of familiarity with optimization methodologies and tools among employees focuses on exploring employees' knowledge of selected methodologies and tools in a given enterprise. The end result is the identification of those that appear to be the most relevant and effective in the context of a given business environment. The paper presents the selected methodologies and optimization tools, justifying their selection and classifying them. Additionally, a brief characterization of the studied enterprise was provided. In the following stages, an analysis of the survey results was conducted, ultimately identifying the best methodologies and optimization tools. As a result of this process, *kaizen* was selected as the most suitable methodology, while *just-in-time* was chosen as the optimization tool.

1. WPROWADZENIE

Celem badawczym artykułu jest analiza znajomości metodologii oraz narzędzi optymalizacyjnych w wybranym przedsiębiorstwie. Dzięki otrzymanym wynikom można wybrać potencjalne techniki zarządcze do implementacji w firmie. Klasyfikacja wspomnianych

* AGH Akademia Górniczo-Hutnicza, Wydział Inżynierii Lądowej i Gospodarki Zasobami.

metodologii i narzędzi nie była przypadkowa. Determinantą odpowiedzialną za przynależność narzędzi optymalizacyjnych do danej grupy było samo przedsiębiorstwo, które je tak klasyfikuje. Klasyfikacja prezentuje się w sposób następujący:

- metodologie:
 - *six sigma*,
 - *agile management*,
 - *kaizen*,
 - *lean manufacturing*,
 - *total quality management*;
- narzędzia:
 - 5S,
 - FMEA,
 - *scrum*,
 - *kanban*,
 - *just-in-time*,
 - *value stream mapping*,
 - *5 why*,
 - *Pareto analysis*,
 - *poka-yoke*,
 - SMED,
 - *total productive maintenance* [1].

Firma, w której przeprowadzono badania, jest przedsiębiorstwem ściśle związanym z rynkiem IT, co sprawia, że automatycznie można ją przypisać do konkretnej metodologii zarządczej, jaką jest *agile management* [2], jednak przedsiębiorstwo nie musi się ograniczać tylko do jednej metodologii. Podczas badań przeprowadzonych w firmie zauważono, że w niektórych płaszczyznach można by zoptymalizować procesy dzięki korzystaniu z odpowiednich narzędzi i metodologii. W przypadku wielu zespołów, jeśli chodzi o funkcjonowanie przedsiębiorstwa, pojawił się pomysł wprowadzenia innego systemu, który służyłby optymalizacji pracy. Przeanalizowano więc wiedzę z zakresu metodologii oraz narzędzi optymalizacyjnych i oceniono, które z nich miałyby największą szansę na zastosowanie w działającym już przedsiębiorstwie. Metodologii i narzędzi mamy wiele, więc skupiono się na tych systemach, które mogłyby się wpasować w specyfikę rynku, na którym działa analizowana firma.

2. ANALIZA BADAŃ I DOBÓR NARZĘDZI ORAZ METODOLOGII ZARZĄDCZYCH

Ankieta, która została przygotowana, przeprowadzono w języku angielskim, ze względu na międzynarodowy zespół pracowników. Wybór tego języka zdecydowanie pomógł w dotarciu do szerszego grona odbiorców. Badanie zostało przeprowadzone w polskich oddziałach (Kraków oraz Kielce). Ankieta składała się z 14 pytań (13 zamkniętych i jednego otwartego), jej wypełnienie zajmowało maksymalnie 10 min. Większość pytań była wielokrotnego wyboru. Ankieta została przeprowadzona w formie anonimowej, rozesłano ją na komunikatorach firmowych i była dostępna przez tydzień.

Pytania, które pojawiły się w badaniu, to:

1. Jaka jest Twoja pozycja w firmie? (manager/pracownik)
2. Jak ważna jest dla Ciebie optymalizacja procesów? (skala 1–5)
3. Które z tych metodologii do optymalizacji procesów są Ci znane/słyszałeś o nich? (*six sigma, agile management, kaizen, lean manufacturing, total quality management*, inne)
4. Jeśli zaznaczono 3 metodologie lub więcej, zaznacz 2 metodologie, które znasz najlepiej (w innym przypadku pomini) (*six sigma, agile management, kaizen, lean manufacturing, total quality management*, inne)
5. Czy chciałbyś uczestniczyć w szkoleniach dotyczących metodologii optymalizacyjnych? (tak/nie)
6. Jeśli wybrałeś odpowiedź „tak”, to w szkoleniu dotyczącym których z poniższych metodologii chciałbyś uczestniczyć? (maks. 2) (*six sigma, agile management, kaizen, lean manufacturing, total quality management*, inne)
7. Które z poniższych narzędzi optymalizacyjnych są Ci znane/słyszałeś o nich? (5S, FMEA, *scrum, kanban, just-in-time, value stream mapping, 5 why, Pareto analysis, poka-yoke, SMED, total productive maintenance*, inne)
8. Czy korzystałeś kiedykolwiek z narzędzi optymalizacyjnych? (tak/nie)
9. Jeśli wybrałeś odpowiedź „tak”, to z jakich narzędzi korzystałeś? (5S, FMEA, *scrum, kanban, just-in-time, value stream mapping, 5 why, Pareto analysis, poka-yoke, SMED, total productive maintenance*, inne)
10. Czy chciałbyś uczestniczyć w szkoleniach dotyczących narzędzi optymalizacyjnych? (tak/nie)
11. Jeśli wybrałeś odpowiedź „tak”, to w szkoleniu dotyczącym których z poniższych narzędzi chciałbyś uczestniczyć? (maks. 3) (5S, FMEA, *scrum, kanban, just-in-time, value stream mapping, 5 why, Pareto analysis, poka-yoke, SMED, total productive maintenance*, inne)
12. Czy uważasz, że narzędzia/metodologie optymalizacyjne przyczyniłyby się do poprawy efektywności i jakości pracy? (tak/nie/inne)
13. Czy masz jakiegokolwiek sugestie lub uwagi dotyczące wprowadzenia lub udoskonalenia wykorzystywania tych narzędzi/metodologii w pracy? (pytanie otwarte)
14. Czy wyraziłbyś chęć nauczania swoich kolegów z pracy wybranej przez siebie metodologii/narzędzia optymalizacyjnego? (tak/nie)

Wszystkie pytania były ze sobą powiązane, ich omówienie zostanie przedstawione w kolejnych podrozdziałach wraz z analizą otrzymanych wyników. Badania przeprowadzono na podstawie przygotowanej uprzednio ankiety. Na ankietę odpowiedziało 71 osób.

Analizując otrzymane dane, można wyciągnąć liczne wnioski oraz dostosować metodologie i narzędzia optymalizacyjne do implementacji w badanym przedsiębiorstwie. Wybór konkretnych strategii zarządzania był determinowany przez różne czynniki. Wśród nich znalazła się chęć uczestnictwa w szkoleniach dotyczących wybranych metodologii i narzędzi oraz ich znajomość wśród kadry kierowniczej.

Wiedząc, że dla ponad połowy ankietowanych optymalizacja jest bardzo ważnym aspektem ich pracy oraz że dla prawie 100% badanych metodologie i narzędzia mają realny wpływ na

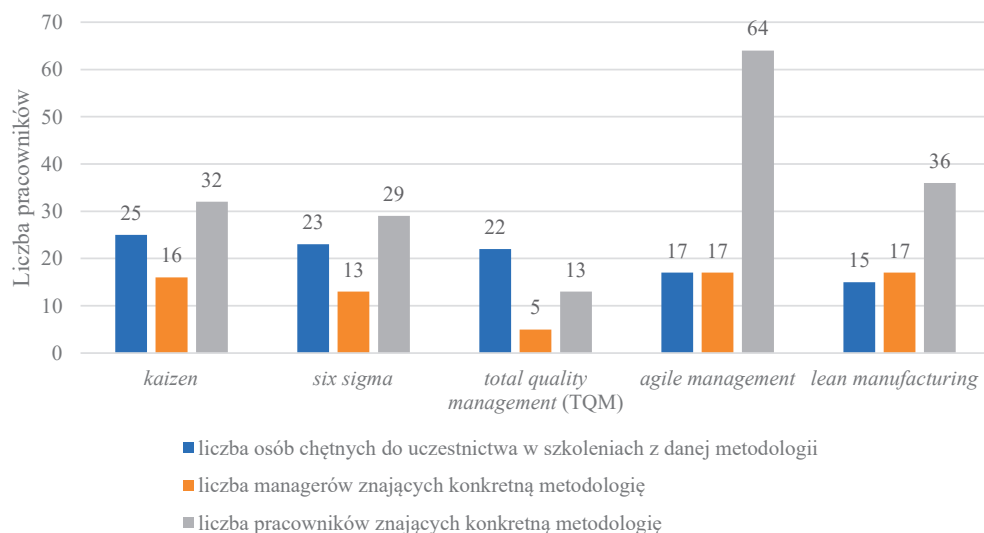
poprawę efektywności i jakości wykonywanej pracy, można łatwo stwierdzić, że wdrożenie wybranych strategii zarządzania spotka się z pozytywnym przyjęciem.

Optymistycznym aspektem jest również to, że połowa respondentów wyraziła chęć szkolenia koleżeńkiego. Istnieje gotowość do aktywnego podnoszenia kwalifikacji i dzielenia się wiedzą za zakresu metodologii i narzędzi optymalizacyjnych. Szkolenia prowadzone przez pracowników mogą dodatkowo ułatwić proces implementacji wybranych sposobów zarządzania.

Najistotniejszym pytaniem jest to, jakie metodologie i narzędzia będą najlepiej dobrane dla badanego przedsiębiorstwa. Przedstawione wnioski ewidentnie pokazują, że ich implementacja może być prosta ze względu na pozytywny odbiór strategii optymalizacyjnych przez pracowników.

2.1. DOBÓR METODOLOGII OPTYMALIZACYJNEJ

Zestawienie odpowiedzi na pytanie o chęć uczestnictwa w poszczególnych szkoleniach z zakresu wybranych metodologii oraz odpowiedzi managerów i pracowników dotyczące ich znajomości dało możliwość wyboru danego sposobu optymalizacyjnego. Wyniki te przedstawiono w sposób graficzny na rysunku 1.



Rys. 1. Liczba głosów oddanych na konkretne metodologie

Kolejność metodologii nie jest przypadkowa, są one posortowane od największej do najmniejszej liczby głosów oddanych na daną metodologię. Jak można zauważyć, pierwsze trzy miejsca zajmują kolejno *kaizen*, *six sigma* i *total quality management*, a następne *agile management* i *lean manufacturing*. Liczbę głosów przedstawiono w tabeli 1.

Tabela 1. Liczba głosów – metodologie

Nazwa metodologii	Liczba oddanych głosów		
	liczba osób chętnych do uczestnictwa w szkoleniach z danej metodologii	liczba managerów znających konkretną metodologię	liczba pracowników znających konkretną metodologię
<i>kaizen</i>	25	16	32
<i>six sigma</i>	23	13	29
<i>total quality management</i>	22	5	13
<i>agile management</i>	17	17	64
<i>lean manufacturing</i>	15	17	36

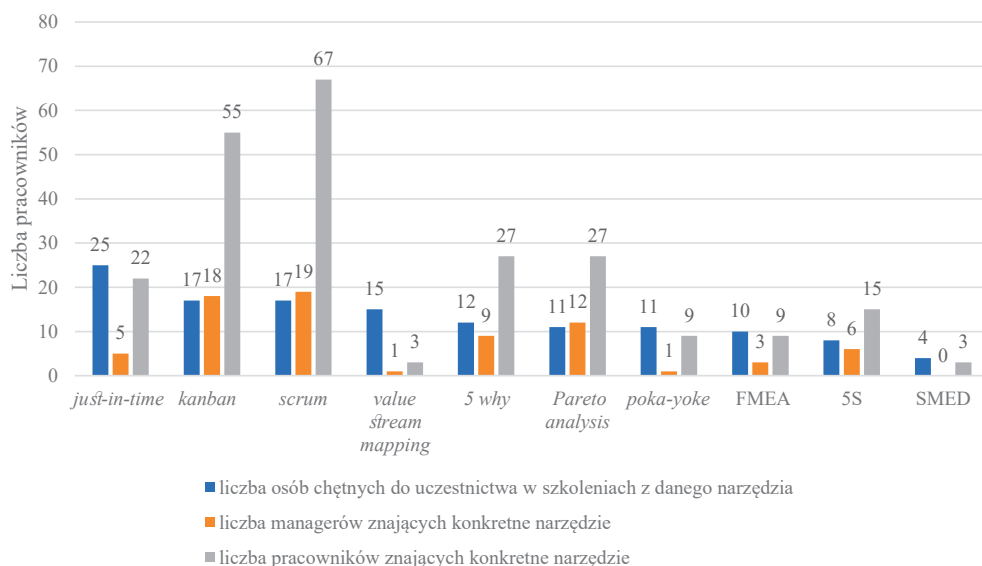
Z analizy rysunku 1 można wywnioskować, że najlepszym wyborem będzie *kaizen*. Jest to metodologia, którą można by najłatwiej wdrożyć w danym przedsiębiorstwie. Czynniki, które o tym świadczą, to między innymi największa liczba głosów oddana na szkolenie z zakresu tej metodologii. Oznacza to, że pracownicy byłoby gotowi wdrożyć ten sposób optymalizacji w funkcjonowaniu przedsiębiorstwa i rozwijać się w tym obszarze. Kolejnym czynnikiem jest popularność tej metodologii wśród środowiska kierowniczego – jest to jeden z najwyższych wyników. Managerowie mający władzę w przedsiębiorstwie oraz (co najważniejsze) wiedzę z zakresu danej metodologii mają większe szanse na implementację jej do firmy. Ich głosy są niezwykle ważne, a posiadana wiedza może zostać przekazana ich zespołom i pojedynczym pracownikom. Aspekt znajomości metodologii wśród pracowników jest również bardzo ważny. Także w tym pytaniu na *kaizen* oddano wiele głosów.

Agile management nie był brany pod uwagę w ankiecie z tego względu, że badane przedsiębiorstwo już pracuje w tym stylu zarządzania. Warto również nadmienić, że pomimo specyfiki danego przedsiębiorstwa *kaizen* jest możliwy do wprowadzenia.

Reasumując, metodologią, którą wybrano jako najbardziej odpowiednią dla badanego przedsiębiorstwa, jest *kaizen*. Przemawiają za tym takie argumenty jak łatwość wcielenia go do firmy, spore zainteresowanie wśród pracowników, znajomość wśród managerów oraz cechy samej filozofii *kaizen*, która opiera się na ciągłym udoskonalaniu, co nie koliduje ze specyfiką branży [3].

2.2. DOBÓR NARZĘDZIA OPTYMALIZACYJNEGO

Porównanie odpowiedzi na pytania dotyczące chęci uczestnictwa w szkoleniach z zakresu konkretnych narzędzi optymalizacyjnych, odpowiedzi kadry kierowniczej na temat ich znajomości oraz ogólnych odpowiedzi, umożliwiło wybór odpowiedniego narzędzia optymalizacyjnego. Wyniki zostały przedstawione graficznie na rysunku 2.



Rys. 2. Liczba głosów oddanych na konkretne narzędzia

Na rysunku 2 kolorem niebieskim oznaczono liczbę osób, które oddały głos na szkolenie z danego narzędzia optymalizacyjnego. Liczbę managerów, którzy są zaznajomieni z danym narzędziem, zaznaczono pomarańczowym kolorem, natomiast liczbę pracowników, którzy mają wiedzę na temat konkretnego narzędzia, zaznaczono kolorem szarym.

Narzędzia na rysunku 2 przedstawiono w porządku od największej do najmniejszej liczby głosów oddanych na szkolenie z konkretnego narzędzia. Pierwsze trzy miejsca zajmują kolejno *just-in-time*, *kanban* i *scrum*, a kolejne *value stream mapping*, *5 why*, *Pareto analysis*, *poka-yoke*, FMEA, 5S i SMED. Liczbę głosów przedstawiono w tabeli 2.

Analizując rysunek 2, można stwierdzić, że najlepszym narzędziem, które można wdrożyć w firmie, jest *just-in-time*. Jest to narzędzie, którego wdrożenie będzie najprostsze. Czynnikiem przemawiającym za słusznością wdrożenia *just-in-time* jest między innymi to, że najwięcej osób było zainteresowanych szkoleniem z jego zakresu – pracownicy chcą się kształcić w kierunku znajomości tej technologii optymalizacyjnej. Kolejnym z czynników była znajomość tego narzędzia. Chociaż nie osiągnęło ono wysokiego wyniku, to wypada dosyć dobrze na tle niektórych innych narzędzi. Narzędzia takie jak *scrum* i *kanban*, które przodują pod względem wiedzy na ich temat, zostały wykluczone, ponieważ są już one używane

w badanym przedsiębiorstwie [4, 5]. *Just-in-time* wypada najlepiej w tym zestawieniu, ponieważ najwięcej pracowników chce mieć z niego szkolenia oraz wielu pracowników zna tę technikę. Pomimo niskiej znajomości tego narzędzia wśród managerów implementacja ma sens i może się spotkać z pozytywnym odbiorem wśród kadr. Samo wprowadzenie narzędzia może być na początku kłopotliwe z powodu niskich zasobów wiedzy wśród kierowników, natomiast odpowiednie szkolenia mogą podnieść ich kwalifikacje, co będzie skutkować wdrożeniem narzędzia w firmie. Kolejnym czynnikiem wskazującym na słuszność wyboru metody *just-in-time* jest to, że pomimo specyfiki firmy i tak możemy je zaimplementować, chociażby w zakresie dostaw oprogramowania do klientów lub zarządzania projektami.

Tabela 2. Liczba głosów – narzędzia

Nazwa narzędzia	Liczba oddanych głosów		
	liczba osób chętnych do uczestnictwa w szkoleniach z danego narzędzia	liczba managerów znających konkretne narzędzie	liczba pracowników znających konkretne narzędzie
<i>just-in-time</i>	25	5	22
<i>kanban</i>	17	18	55
<i>scrum</i>	17	19	67
<i>value stream mapping</i>	15	1	3
<i>5 why</i>	12	9	27
<i>Pareto analysis</i>	11	12	27
<i>poka-yoke</i>	11	1	9
FMEA	10	3	9
5S	8	6	15
SMED	4	0	3

Podsumowując, narzędziem do implementacji w wybranym przedsiębiorstwie jest *just-in-time*. Przemawiają za tym takie argumenty jak duże zainteresowanie szkoleniami wśród pracowników, duża znajomość tego narzędzia oraz możliwość jego dobrego wykorzystywania w projektach i poprawienia funkcjonowania firmy [6].

3. PODSUMOWANIE

Celem zaprezentowanego artykułu była analiza odpowiednich narzędzi zarządczych do optymalizacji procesów. Osiągnięcie tego celu wymagało przeprowadzenia w wybranym przedsiębiorstwie badań z zakresu metodologii i narzędzi optymalizacyjnych. Badania

koncentrowały się na znajomości wybranych filozofii optymalizacyjnych oraz ocenie stosunku pracowników do optymalizacji. Zbadano, czy optymalizacja jest istotnym elementem ich życia zawodowego, czy też nie.

Dzięki przeprowadzonym badaniom i ich analizie udało się osiągnąć główny cel artykułu. Na podstawie zebranych danych zidentyfikowano odpowiednie narzędzia i metodologie optymalizacyjne, które mogą zostać wdrożone w firmie jako nowe, skuteczne schematy zarządzania. Przeprowadzone badania dostarczyły wyczerpujących informacji dotyczących metod optymalizacyjnych. Wyniki jasno pokazują, jakie sposoby kierowania procesami mają realne szanse na ich wdrożenie w firmie.

Podsumowując wyniki przeprowadzonych badań, można uznać, że metodologią, która jest najbardziej odpowiednia dla badanego przedsiębiorstwa oraz którą będzie najprościej wprowadzić, jest *kaizen*, czyli nieustanne usprawnianie procesów. *Kaizen* otrzymała największą liczbę głosów w pytaniu o zainteresowanie szkoleniem oraz wielu pracowników i managerów zna tę metodologię. Ponieważ była to najpopularniejsza metodologia szkoleniowa, można wysunąć wnioski, że pracownicy najchętniej będą ją stosowali. Kolejnym pozytywnym aspektem jest to, że spory odsetek badanych managerów również zna tę metodologię, co skutkuje łatwiejszą jej implementacją, ze względu na możliwości kierowników.

Agile management okazał się najbardziej znaną metodologią, lecz nie został uwzględniony w badaniu, ponieważ jest już używany w firmie. Był on wskaźnikiem podczas badań.

Narzędziem optymalizacyjnym uznanym za najbardziej odpowiednie dla badanej firmy zostało *just-in-time*. Pomimo specyfiki analizowanego przedsiębiorstwa możliwe jest wdrożenie tego narzędzia. Dzięki temu sposobowi optymalizacyjnemu można by uniknąć opóźnień podczas wydawania projektów. *Just-in-time* otrzymało największą liczbę głosów w pytaniu o zainteresowanie szkoleniami, ale nie jest to jedno z popularniejszych narzędzi wśród managerów i pracowników. Warto jednak zwrócić uwagę na to, że jest to świetne narzędzie, które może bardzo dużo wnieść do firmy i – co ważniejsze – kadra pracownicza wyraziła chęć do udziału w szkoleniach z tego zakresu.

Narzędzia takie jak *kanban* i *scrum*, które były jednymi z popularniejszych, nie zostały wzięte pod uwagę, ponieważ są już one wykorzystywane w przedsiębiorstwie. Posłużyły one jako jeden z użytych wskaźników.

Wyniki ankiety pokazują, że najpopularniejszymi systemami zarządzania były metodologia *agile management* oraz narzędzia *scrum* i *kanban*. Jest to spowodowane specyfiką firmy oraz branżą, w jakiej ona działa.

Dzięki przeprowadzonej ankiecie można było w łatwy sposób przefiltrować metodologie i narzędzia optymalizacyjne, a następnie je odpowiednio dobrać z uwzględnieniem specyfiki badanej firmy zgodnie z jej wewnętrzną klasyfikacją.

Omówione badania dostarczają analizowanemu przedsiębiorstwu ogromu wiedzy z zakresu narzędzi i metodologii optymalizacyjnych. Przedstawiona analiza obejmuje wiele ciekawych aspektów i pozwala ocenić realną możliwość ich wdrożenia. Implementacja wybranej metodologii i narzędzia mogłaby się przełożyć na poprawę sprawności procesów w firmie, a co za tym idzie – lepsze wykorzystanie zasobów i efektywniejsze zarządzanie nimi.

LITERATURA

- [1] Stadnicka D., *Wprowadzenie*, [w:] Stadnicka D. (red.), *Lean manufacturing: kompendium wiedzy*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej, Rzeszów 2021, s. 7–8.
- [2] Wiglusz E., *Metody stosowane w zarządzaniu łańcuchem dostaw*, [w:] Stadnicka D. (red.), *Lean manufacturing: kompendium wiedzy*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej, Rzeszów 2021, s. 98–102.
- [3] Pietrzyk D., *Kaizen*, [w:] Stadnicka D. (red.), *Lean manufacturing: kompendium wiedzy*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej, Rzeszów 2021, s. 148–151.
- [4] Schwaber K., Sutherland J., *The Scrum Guide. The Definitive Guide to Scrum: The Rules of the Game*, 2020, <https://scrumguides.org/docs/scrumguide/v2020/2020-Scrum-Guide-US.pdf> [dostęp: 4.04.2024].
- [5] Farion A., *Kanban*, [w:] Stadnicka D. (red.), *Lean manufacturing: kompendium wiedzy*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej, Rzeszów 2021, s. 103–107.
- [6] Biały K., *System Just in Time*, [w:] Stadnicka D.
- [7] (red.), *Problemy w obszarach produkcyjnych. Część 1. Proste metody w trudnych zadaniach. Studia przypadków: kompendium wiedzy*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej, Rzeszów 2021, s. 58–61.

Kamil Misiurek*

ŚWIADECTWA CHARAKTERYSTYKI ENERGETYCZNEJ – ANALIZA WYNIKÓW DOTYCZĄCYCH LOKALI MIESZKALNYCH Z OKRESU 1950–1990

Przedmiotem artykułu są świadectwa charakterystyki energetycznej oraz metodologia ich wyznaczania. Zostały objaśnione podstawowe definicje, takie jak energia użytkowa, końcowa i pierwotna, a także przedstawiony zostanie wzór karty świadectwa charakterystyki energetycznej. Wykonane obliczenia oraz otrzymane wyniki zostały zaprezentowane graficznie, co pokazało mocne oraz słabe strony pewnych rozwiązań. W końcowej części dokonano analizy otrzymanych wyników i wyciągnięto wnioski dotyczące efektywności energetycznej badanych lokali mieszkalnych. Wyniki badań uzyskano z rzeczywistych pomiarów lokali mieszkalnych. Artykuł stanowi podsumowanie pracy nad analizą energetycznej efektywności lokali mieszkalnych w Lublinie, z okresu 1950–1990. Dostarcza informacji na temat ich efektywności energetycznej oraz wskazuje potencjalne obszary do poprawy pod względem energetycznym.

ENERGY PERFORMANCE CERTIFICATES – ANALYSIS OF RESULTS REGARDING RESIDENTIAL PROPERTIES FROM THE PERIOD OF 1950–1990

The article focuses on energy performance certificates and the methodology for their determination. Basic definitions such as useful, final, and primary energy will be explained, along with the presentation of the energy performance certificate template. Calculations and results will be graphically presented to highlight the strengths and weaknesses of certain solutions. In the final section, an analysis of the obtained results will be conducted, drawing conclusions regarding the energy efficiency of the examined residential properties. The research is based on real measurements of residential properties. The article serves as a summary of the study on the energy analysis of residential properties from the 1950–1990 period in Lublin, providing insight into their energy efficiency and identifying potential areas for energy improvement.

* AGH Akademia Górniczo-Hutnicza, Wydział Zarządzania, Studenckie Koło Naukowe Nova Energia.

1. WSTĘP

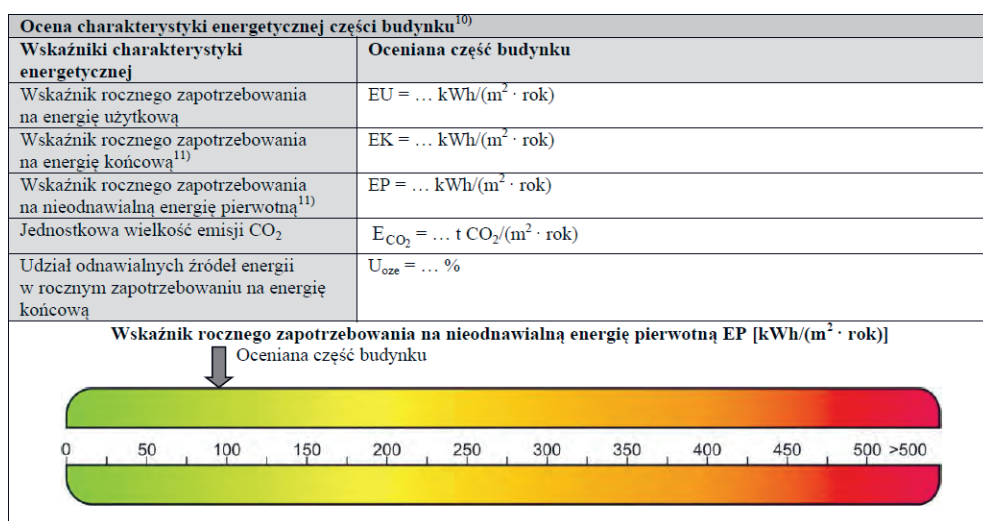
Od momentu wprowadzenia w polskim ustawodawstwie terminu „świadcstwo charakterystyki energetycznej budynku” 1 stycznia 2009 roku kwestie związane z efektywnością energetyczną budynków stały się nieodłączną częścią dyskusji dotyczących środowiska i gospodarki. Dyrektywa 2002/91/WE Parlamentu Europejskiego i Rady Europy [1], która legitymizowała to pojęcie, wytyczyła cel poprawy sprawności energetycznej budynków. Aktualnie regulacje dotyczące świadectw charakterystyki energetycznej budynków znajdują się w odrębnej ustawie z dnia 29 sierpnia 2014 roku o charakterystyce energetycznej budynków [2] oraz w rozporządzeniu w sprawie metodologii wyznaczania charakterystyki energetycznej budynku lub części budynku i świadectw charakterystyki energetycznej [3]. Istotna jest informacja, że świadectwo charakterystyki energetycznej ważne jest przez dziesięć lat. Dokument ten traci ważność przed upływem tego terminu, jeżeli w wyniku przeprowadzonych robót budowlano-instalacyjnych uległa zmianie charakterystyka energetyczna budynku lub części budynku [1]. W artykule tym skupiono się na analizie otrzymanych wartości dotyczących lokali mieszkalnych, opracowanych zgodnie z obowiązującą metodologią, oraz wskazano jej słabe punkty i zaproponowano rozwiązania.

Świadectwo charakterystyki energetycznej to dokument, który określa ilość energii niezbędnej do zaspokojenia potrzeb energetycznych związanych z użytkowaniem budynku lub części budynku, czyli energię na potrzeby ogrzewania i wentylacji, przygotowania ciepłej wody użytkowej, chłodzenia, a w przypadku budynków niemieszkalnych również oświetlenia. Obowiązek posiadania w określonych sytuacjach świadectwa charakterystyki energetycznej budynku lub części budynku wynika z prawa europejskiego [1]. Celem wprowadzenia obowiązku sporządzania świadectw jest promowanie budownictwa efektywnego energetycznie i zwiększanie świadomości społecznej w zakresie możliwości uzyskania oszczędności energii w budynkach. Dzięki informacjom zawartym w świadectwie właściciel, najemca lub użytkownik budynku może określić orientacyjne roczne zapotrzebowanie na energię, a tym samym koszt utrzymania związany ze zużyciem energii. Zasady sporządzania i przekazywania świadectw charakterystyki energetycznej budynków zostały określone w ustawie z dnia 29 sierpnia 2014 roku o charakterystyce energetycznej budynków [2]. Ostatnia nowelizacja tej ustawy 28 kwietnia 2023 roku [2] wymusiła obowiązek załączania świadectwa charakterystyki energetycznej budynku lub części budynku pod karą grzywny, gdy przedmiotem umowy jest sprzedaż lub wynajem.

Na rysunku 1 przedstawiono pierwszą stronę wraz z kluczowymi wskaźnikami energetycznymi określającymi wartościowo analizowany budynek lub lokal. Wzór samych certyfikatów pozostawiony jest krajom członkowskim. W związku z tym część państw (m.in. Polska) przyjęła rozwiązanie skali ciągłej, gdzie na linii (tzw. suwaku) pokazuje się wskaźnik rocznego zapotrzebowania na nieodnawialną energię pierwotną (*EP*) oraz wartość graniczną określoną prawem budowlanym (wartość graniczna jest pokazana tylko wtedy, gdy sporządzany dokument dotyczy całego budynku).

Przedstawiona w artykule analiza odnosi się przede wszystkim do lokali mieszkalnych, które według rozporządzenia [3] nie wymagają uwzględnienia oświetlenia oraz nie mają przestroni chłodzonych. Przy takich założeniach wskaźniki *EU/EK/EP* pozwalają porównywać

między sobą analizowane części budynków pod kątem energetycznym. Energia użytkowa (EU) jest to energia, którą trzeba dostarczyć do rozpatrywanych pomieszczeń ogrzewanych, żeby zapewnić w nich wymaganą temperaturę. Energia końcowa jest to stosunek EU podzielony przez całkowitą sprawność naszej instalacji doprowadzającej ciepło. Nieodnawialna energia pierwotna uwzględnia zapotrzebowanie na energię końcową budynku i dodatkowe nakłady energii potrzebne na produkcję paliwa, jego transport, magazynowanie. Jest to iloczyn EK i odpowiedniej wartości współczynnika nieodnawialnej energii pierwotnej (w_i) paliwa, z którego wytwarzane jest ciepło. Wartość współczynnika w_i w przypadku różnych nośników energii jest przedstawiona w rozporządzeniu [3] lub udostępniona przez przedsiębiorstwo ciepłe w sytuacji ciepła sieciowego [4, 5].



Rys. 1. Wskaźniki zawarte w świadectwie energetycznym

Źródło: [3]

Metoda i wyniki

Analiza, którą przeprowadzono, miała na celu zbadanie trendów oraz wpływu różnych czynników na efektywność energetyczną budynków mieszkalnych w Lublinie (tab. 1). Konkretnie badano wpływ długości ścian zewnętrznych oraz współczynnika przenikania ciepła na wartość trzech kluczowych wskaźników: EU , EK i EP , które są istotne dla oceny efektywności energetycznej budynków. W analizie uwzględniono dane pochodzące z 17 lokalizacji mieszkalnych zbudowanych w latach 1950–1990 na terenie Lublina. Przeprowadzono symulacje w oprogramowaniu wspomagającym obliczenia – Arcadia TermoCad 10, które umożliwiło dokładne zbadanie różnych scenariuszy i parametrów wpływających na efektywność energetyczną. Wyniki analizy dostarczyły cennych informacji na temat trendów oraz czynników determinujących wartości wskaźników EU , EK i EP . Dodatkowo zasymlowano wartości wskaźnika EP dotyczące różnych miejscowości w Polsce, zależnie od parametrów pracy dostarczanych przez lokalne ciepłownie.

Tabela 1. Opis oraz wyniki przeprowadzonej analizy lokali mieszkalnych

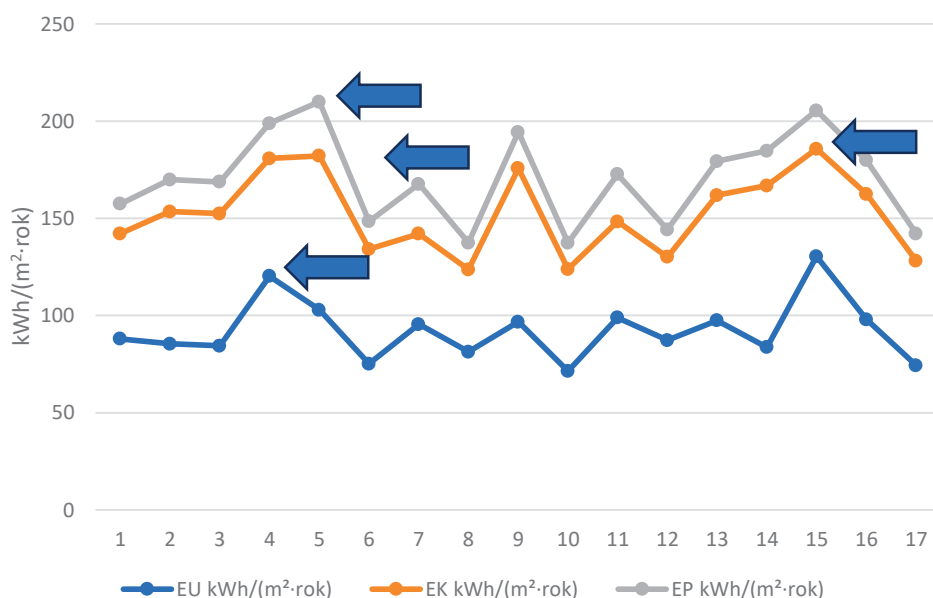
Charakterystyka	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
Technologia budowy ¹	OWT-67	W-70	OWT-70	UW2Z	W-70	UW-2Z	W-70	W70	OWT-67	OWT	OWT-67	OWT-67	OWT-67	mieszana	mieszana	OWT-67	OWT-67
Długość ścian zewnętrznych [m] ²	23,8	18,2	13	13,3	6	23,8	14	20,5	20,6	7,2	14	14	16,3	5,4	8,1	10,8	18,1
Czy nad lokalem znajduje się pomieszczenie nieogrzewane?	nie	nie	nie	tak	nie	nie	nie	nie	nie	nie	nie	nie	nie	nie	tak	nie	nie
Czy budynek był ocieplony?	tak	tak	tak	tak	nie	tak	tak	tak	tak	tak	tak	tak	tak	tak	tak	tak	tak
Wartość współczynnika przenikania ciepła U dotyczącego przegrody zewnętrznej [W/(m ² ·K)]	0,25	0,23	0,30	0,32	0,52	0,17	0,29	0,25	0,27	0,25	0,30	0,33	0,30	0,38	0,27	0,31	0,22
EU [kWh/(m ² ·rok)]	88	85	84	95	102	75	105	81	96	71	98	87	97	83	130	97	74
EK [kWh/(m ² ·rok)]	142	153	152	161	182	134	184	123	175	123	172	130	161	166	185	162	128
EP [kWh/(m ² ·rok)]	157	169	168	178	209	148	204	137	194	137	190	144	179	184	205	179	142

¹ Technologia budowy – lokale mieszkalne, które zostały poddane analizie, zostały wzniesione z wielkowymiarowych prefabrykowanych elementów betonowych lub żelbetonowych. Był to popularny sposób budownictwa w okresie 1960–1990 w Polsce. W różnych regionach w Polsce można było spotkać różne systemy budownictwa wielkopłytowego, które różniły się materiałem prefabrykatu, jego długością, szerokością itd. Powstały w taki sposób różne nazwy systemów, które stały się typowe dla danego regionu. Źródło: [6]

² Długość ścian zewnętrznych – długość ścian zewnętrznych oraz ich współczynnik przenikania ciepła ma bezpośredni (w ocenie autora artykułu) wpływ na otrzymane wyniki. Niektóre mieszkania mają taką samą powierzchnię, ale długość ścian różną, co wynika np. z faktu, że jedno mieszkanie jest „środkowe” z dwoma ścianami, a drugie mieszkanie jest „skrajne” z trzema ścianami. Mieszkanie z trzema ścianami będzie mniej korzystnym wariantem niż to z dwoma.

2. ANALIZA WYNIKÓW

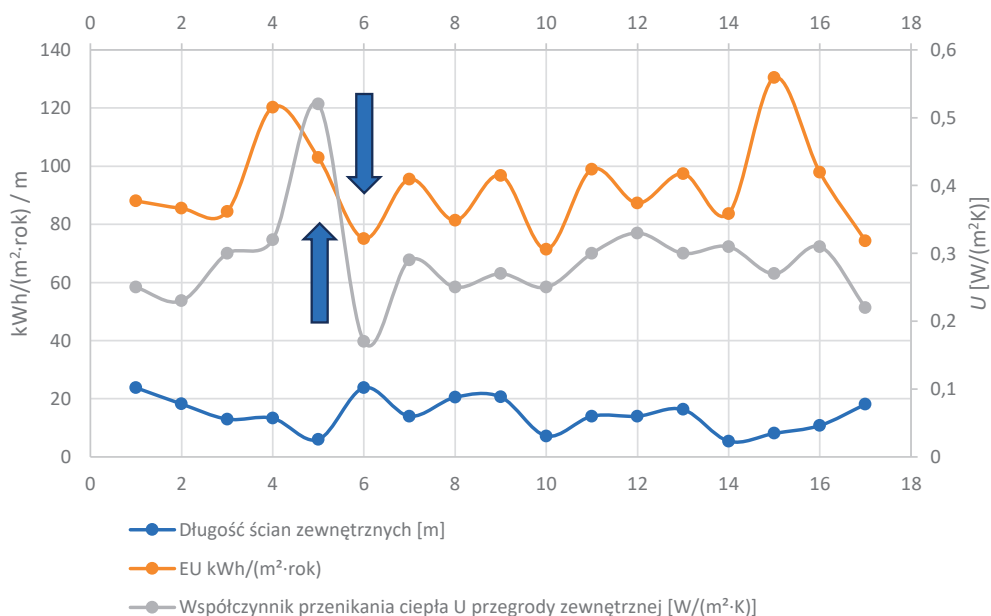
Większość analizowanych budynków było poddanych termomodernizacji przed 2010 rokiem, co jest istotnym czynnikiem w kontekście analizy efektywności energetycznej. Termomodernizacja oznacza najczęściej uwzględnienie doprowadzenia pionowych przegród w obowiązujących przepisach budowlanych, zawartych w Warunkach Technicznych (WT) [7, 8]. To z kolei może wpłynąć na brak widocznej korelacji między współczynnikiem przenikania ciepła w przypadku przegród pionowych a rokiem budowy. Brak korelacji pomiędzy tymi dwoma zmiennymi jest wynikiem działań mających na celu spełnienie wymagań dotyczących wartości współczynnika przenikania ciepła (WT) w trakcie przeprowadzania termomodernizacji. Natomiast istotną obserwacją z analizy jest fakt, że największe wartości wskaźników efektywności energetycznej (EU , EK , EP) zaobserwowano w przypadku mieszkań, nad którymi znajdowała się przestrzeń lub pomieszczenie nieogrzewane. Taka sytuacja jest typowa dla lokali znajdujących się na ostatniej kondygnacji budynku (rys. 2). Jest to istotne spostrzeżenie, które sugeruje, że mieszkania na wyższych piętrach mogą być bardziej narażone na straty ciepła, co może być wynikiem większej ekspozycji na warunki atmosferyczne lub niedostatecznej izolacji cieplnej przegród poziomych.



Rys. 2. Wartość wskaźnika EU , EK i EP w przypadku analizowanych lokali mieszkalnych

Przeprowadzona analiza efektywności energetycznej budynków mieszkalnych na terenie Lublina wykazała, że wartość wskaźnika EP w przypadku badanych mieszkań jest zawsze powyżej $136 \text{ kWh}/(\text{m}^2 \cdot \text{rok})$. Wartość ta stanowi istotny punkt odniesienia, gdyż wskaźnik EP mierzy roczne zużycie energii pierwotnej na jednostkę powierzchni użytkowej budynku. Fakt, że wszystkie analizowane mieszkania przekraczają tę wartość, sugeruje istnienie potencjału do poprawy efektywności energetycznej i redukcji zużycia energii pierwotnej w tych

budynkach. Należy zauważyć, że oprócz długości przegrody zewnętrznej i współczynnika przenikania ciepła (U) na uzyskane wyniki EU i EK wpływają również inne czynniki. W analizie uwzględniono takie zmienne, jak powierzchnia okien, orientacja okien na strony świata, wysokość pomieszczeń, mostki cieplne, długość ściany wewnętrznej oddzielającej klatkę od mieszkania oraz temperatura panująca na klatce. Te dodatkowe czynniki mają istotny wpływ na efektywność energetyczną budynków mieszkalnych, jednak nie zostały one uwzględnione w tabeli 1. Zaznaczone strzałki przy punktach pomiarowych numer 4, 5, 6 i 15 na rysunku 2 wskazują wartości znacząco odbiegające od pozostałych pomiarów. Rysunek 3 wyjaśnia w sposób graficzny, co wpłynęło na odstępstwa od pozostałych badanych przypadków we wskazanych lokalach mieszkalnych.



Rys. 3. Wartość wskaźnika EU , długości ścian zewnętrznych (lewa pionowa oś) oraz współczynnik przenikania ciepła U przegrody zewnętrznej (prawa pionowa oś)

Jak można zauważyć na powyższym rysunku, wartość wskaźnika EU w przypadku czwartego pomiaru jest stosunkowo wysoka przy niewielkiej wartości długości ścian zewnętrznych w tym mieszkaniu. Kluczowy wpływ na wysoką wartość wskaźnika EU , która przełożyła się na pozostałe wskaźniki, miała lokalizacja mieszkania. Analizowany lokal znajdował się na ostatniej ogrzewanej kondygnacji, nad nim znajdowała się nieogrzewana przestrzeń, a ocieplenie przegrody poziomej oddzielającej przestrzeń ogrzewaną od nieogrzewanej nie spełniało obowiązujących wymagań. Do podobnych wniosków można dojść przy analizie piętnastego pomiaru. Wyniki nie sugerują bezpośredniego związku pomiędzy długością ścian i współczynnikiem przenikania ciepła oraz wpływu tych parametrów na otrzymaną wartość EU . Powodem wysokiej wartości wskaźnika EU w tej sytuacji był również fakt, że nad mieszkaniem znajduje się nieogrzewane pomieszczenie.

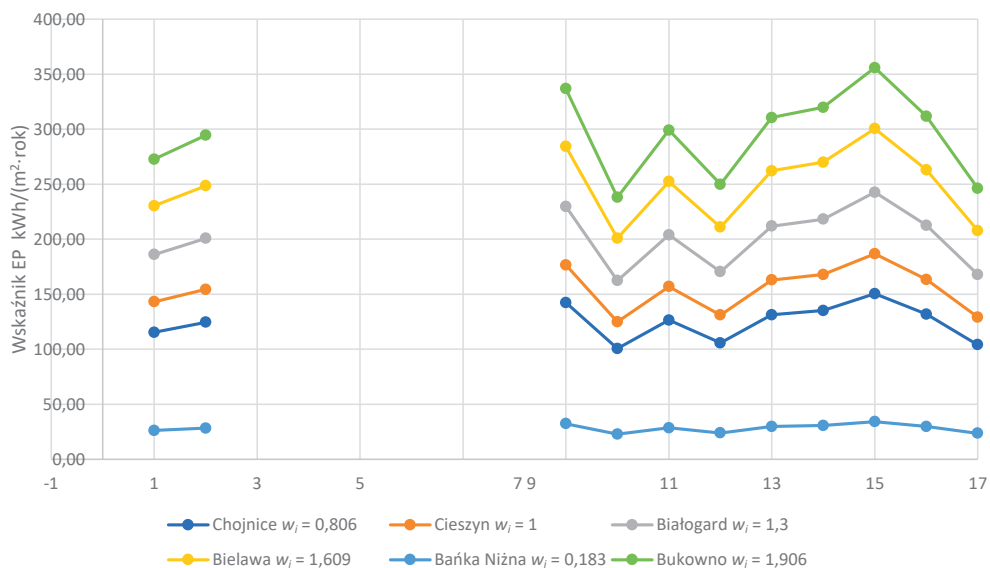
Patrząc na wyniki dotyczące lokalu piątego, widoczne na rysunku 3, można stwierdzić, że wartość EU nie odbiega od pozostałych pomiarów. Jednak zwraca uwagę fakt, że lokal ten ma wysoką wartość współczynnika przenikania ciepła przegrody, czyli około $0,5 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$, przy niewielkiej długości ścian. Ponadto wpływ na wysoką wartość EK i EP widoczną na rysunku 2 ma niska sprawność instalacji grzewczej. Analizując szósty pomiar, można zauważyć, że współczynnik przenikania ciepła tej przegrody spełnia Warunki Techniczne WT 2021 (U w przypadku ścian zewnętrznych poniżej $0,2 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$) i pomimo stosunkowo dużej powierzchni wymiany ciepła w tym lokalu wskaźnik EU jest niski.

Ocieplenie przegród zewnętrznych i dostosowanie ich do standardów określonych w Warunkach Technicznych WT 2021 [9] stanowi ważny krok w dążeniu do poprawy efektywności energetycznej mieszkań i budynków, jak można zauważyć na przykładzie wykonanego pomiaru piątego i szóstego. Badania przeprowadzone w przypadku szóstego pomiaru pokazały wyraźną redukcję zapotrzebowania na energię użytkową po przeprowadzeniu tego rodzaju termomodernizacji. Ocieplenie przegród zewnętrznych polega na zastosowaniu izolacji termicznej na zewnątrz budynku, co pomaga w zminimalizowaniu strat ciepła przez ściany, dachy oraz fundamenty. W przypadku dostosowania do standardów WT 2021 może to oznaczać zastosowanie izolacji o wyższej skuteczności termicznej, lepsze uszczelnienie przegród oraz wykorzystanie materiałów o niższym współczynniku przenikania ciepła. Efektem przeprowadzonych termomodernizacji jest obserwowane mniejsze zapotrzebowanie na energię użytkową w szóstym analizowanym przypadku, przy stosunkowo wysokiej wartości długości ścian zewnętrznych tego lokalu w stosunku do pozostałych. Spadek zużycia energii jest bezpośrednim rezultatem zmniejszenia strat ciepła z mieszkania, co przekłada się na niższe koszty eksploatacyjne oraz mniejsze obciążenie dla środowiska naturalnego. Analiza szóstego przypadku potwierdza istotność ocieplenia przegród zewnętrznych i dostosowania ich do aktualnych standardów efektywności energetycznej. Właściciele i użytkownicy mieszkań oraz budynków mogą korzystać z większego komfortu cieplnego przy jednoczesnym zmniejszeniu rachunków za energię. Ocieplenie przegród zewnętrznych i dostosowanie ich do standardów WT 2021 są zatem kluczowymi działaniami w przypadku budowania bardziej efektywnych energetycznie i zrównoważonych pod względem środowiskowym mieszkań i innych lokali czy też domów.

Na rysunku 4 przedstawiono największą wadę przepisów związanych ze świadectwami charakterystyki energetycznej. Zgodnie z rozporządzeniem dotyczącym metodologii sporządzania świadectw charakterystyki energetycznej [2], najogólniej ujmując, energia pierwotna jest równa iloczynowi energii końcowej przemnożonej przez współczynnik nakładu nieodnawialnej energii pierwotnej [10]. Współczynnik w_p , zgodnie z ustawą [3], lokalne przedsiębiorstwo energetyki ciepłej ma obowiązek udostępniać raz w roku (za rok poprzedni) przy wykorzystaniu środków komunikacji.

W Polsce współczynnik nakładu nieodnawialnej energii pierwotnej w zależności od lokalizacji oscyluje od 0 do ponad 2. Prowadzi to do dość nieoczekiwanych sytuacji. Nowo wybudowany budynek jedno- lub wielorodzinny podłączony do miejskiej sieci ciepłej będzie nieekologiczny w jednym regionie Polski, a ekologiczny w drugim. Kwestia staje się poważniejsza, gdy należy oddać taki nowo wybudowany budynek do użytku. Zostanie zlecone wykonanie świadectwa energetycznego dla tego budynku i okaże się, że pomimo przegród

bardzo dobrze zaizolowanych (zgodnie z aktualnymi wymaganiami) oraz przy zastosowaniu wysoko sprawnej instalacji grzewczej budynek nie spełnia warunku w zakresie EP , gdyż sieć miejska w dużej mierze opiera się na węglu lub innym paliwie stałym.



Rys. 4. Wartość wskaźnika EP w zależności od lokalizacji i współczynnika w_i udostępnionego przez ciepłownię

W roku 2023 współczynnik nakładu nieodnawialnej energii pierwotnej w Lublinie wynosił 1,1 (za rok 2022). W styczniu 2024 roku Zakład Energetyki Ciepłej w Lublinie udostępnił informację, że współczynnik w_i wynosi 0,36 (za rok 2023) [4].

Świadectwo charakterystyki energetycznej (ŚCHE) wydawane jest na 10 lat i traci ważność, jeżeli w wyniku przeprowadzonych robót budowlano-instalacyjnych uległa zmianie charakterystyka energetyczna budynku lub części budynku [1]. Znacząca zmiana współczynnika nakładu nieodnawialnej energii pierwotnej w Lublinie może sugerować, że wydane w zeszłym roku świadectwa budynków, które podłączone są do lubelskiej sieci miejskiej, są nieważne.

3. PODSUMOWANIE I WNIOSKI

Należy zauważyć, że opisana sytuacja wyraźnie wskazuje na brak zasadności porównywania budynków lub lokali jedynie na podstawie wskaźnika EP , ponieważ jego wartość jest silnie uzależniona od stanu prawnego oraz charakterystyki ogrzewania z sieci miejskiej. Dlatego też kryterium osiągnięcia wskaźnika EP , poniżej określonej wartości, zapisane w warunkach technicznych, jest krzywdzące. Należy bardzo poważnie rozważyć zasadność stosowania tego kryterium w obowiązujących Warunkach Technicznych, gdyż wskaźnik ten nie

sprawdza się w dziedzinie budownictwa mieszkalnego jedno- i wielorodzinnego. Wskaźnik *EU* daje wyobrażenie, czy analizowany obszar jest nisko- czy wysokoenergetyczny, zaś wskaźnik *EK* odpowie nam na pytania, czy zastosowany system instalacji CO i CWU jest nisko- czy wysokosprawny [11].

LITERATURA

- [1] *Dyrektywa 2002/91/WE Parlamentu Europejskiego i Rady z dnia 16 grudnia 2002 r. w sprawie charakterystyki energetycznej budynków*, OJ L 1, 4.01.2003, <http://data.europa.eu/eli/dir/2002/91/oj> [dostęp: 2.03.2024].
- [2] *Ustawa z dnia 29 sierpnia 2014 r. o charakterystyce energetycznej budynków*, Dz.U. 2024 poz. 101.
- [3] *Rozporządzenie Ministra Infrastruktury i Rozwoju z dnia 27 lutego 2015 r. w sprawie metodologii wyznaczania charakterystyki energetycznej budynku lub części budynku oraz świadectw charakterystyki energetycznej*, Dz.U. 2015 poz. 376.
- [4] *Lubelskie Przedsiębiorstwo Energetyki Ciepłej S.A. (LPEC), Wskaźniki systemu ciepłowniczego*, <https://lpec.pl/cieplo-systemowe/wskazniki-systemu-cieplowniczego/> [dostęp: 2.03.2024].
- [5] *Audyty i świadectwa energetyczne budynków, Podstawa prawna konieczności publikowania wskaźnika Wpc*, 24.01.2024, <https://www.audytyiswiadectwa.pl/index.php/podstawa-prawna-koniecznoscii-publikowania-wskaznika-wpc> [dostęp: 2.03.2024].
- [6] Wikipedia: Wolna Encyklopedia, *Technologia wielkopłytkowa*, 30.03.2024, https://pl.wikipedia.org/wiki/Technologia_wielkoplytkowa [dostęp: 9.03.2024].
- [7] *Ustawa z dnia 20 maja 2016 r. o efektywności energetycznej*, Dz.U. 2016 poz. 831.
- [8] *Rozporządzenie Ministra Infrastruktury z dnia 12 kwietnia 2002 r. w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać budynki i ich usytuowanie*, Dz.U. 2022 poz. 1225.
- [9] *Obwieszczenie Ministra Rozwoju i Technologii z dnia 15 kwietnia 2022 r. w sprawie ogłoszenia jednolitego tekstu rozporządzenia Ministra Infrastruktury w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać budynki i ich usytuowanie*, Dz.U. 2022 poz. 1225.
- [10] *Rozporządzenie Ministra Klimatu i Środowiska z dnia 12 kwietnia 2022 r. zmieniające rozporządzenie w sprawie szczegółowego zakresu i sposobu sporządzania audytu efektywności energetycznej oraz metod obliczania oszczędności energii*, Dz.U. 2022 poz. 956.
- [11] *Rozporządzenie Ministra Energii z dnia 5 października 2017 r. w sprawie szczegółowego zakresu i sposobu sporządzania audytu efektywności energetycznej oraz metod obliczania oszczędności energii*, Dz.U. 2017 poz. 1912.

Mykhailo Pavliuk*, Vitalii Horielov**

METHODS OF CYBERATTACKS' DETECTION BASED ON NETWORK TRAFFIC ANALYSIS

The paper analyzes modern methodologies and algorithms for detecting cyberthreats, including those utilizing artificial intelligence and machine learning for real-time and retrospective traffic analysis. The use of statistical analysis, machine learning, and artificial neural networks in detecting anomalies and non-standard behavior patterns in network traffic data is investigated. A comparative analysis of the speed and effectiveness of various groups of methods is provided, and a structure for the cluster of data flow collection is developed.

METODY WYKRYWANIA CYBERATAKÓW OPARTE NA ANALIZIE RUCHU SIECIOWEGO

W pracy zanalizowano współczesne metody i algorytmy wykrywania zagrożeń cybernetycznych, w tym te, które wykorzystują sztuczną inteligencję i uczenie maszynowe do analizy ruchu w czasie rzeczywistym i retrospektywnie. Zbadano wykorzystanie analizy statystycznej, uczenia maszynowego i sztucznych sieci neuronowych w kontekście wykrywania anomalii i nietypowych wzorców zachowań w danych ruchu sieciowego. Przeprowadzono analizę porównawczą szybkości i skuteczności różnych grup metod, a także opracowano strukturę klastra zbierania danych przepływu.

1. INTRODUCTION

The modern development of broadband Internet and web technologies has led to an avalanche-like growth of network traffic. In addition to servers and user computers, the network includes mobile terminals, routers and access points with their own operating systems, IoT devices and others that generate, route and consume traffic. However, not all of them are equipped with powerful modern firewalls or other means of protection against various network attacks. Some are due to a lack of hardware resources, others – due to the lack of focus of developers and manufacturers on network security.

* Vasyl Stefanyk Precarpathian National University, Faculty of Mathematics and Computer Science, Ivano-Frankivsk, Ukraine; AGH University of Krakow, uKOD Data Protection Students Scientific Association.

** Vasyl Stefanyk Precarpathian National University, Faculty of Mathematics and Computer Science, Ivano-Frankivsk, Ukraine.

Relevance of the topic

Access to financial, commercial, and other sensitive information by attackers threatens the lives, health, and wealth of citizens, as well as the success and financial stability of companies, so the development of threat prevention tools remains relevant. The constant expansion of data analysis capabilities, including those obtained in real time, creates opportunities for the development of new cyberthreat detection tools, and the open-source nature of many tools makes it possible to create new open-source tools. This, in turn, significantly increases their accessibility and provides community support in improving the tools.

Object of study

Security systems and algorithms that use network traffic analysis to detect and prevent cyberattacks, methods of improving them through the use of modern mathematical tools.

Subject of research

Methods and approaches to analyzing network traffic, metrics for comparing the effectiveness of methods and evaluating the performance of methods in real conditions.

Purpose of the study

Development of a software solution that performs streaming data collection on network traffic, analyzes it in real time and warns of possible cyberattacks on local network computers, penetration into the local network.

Objectives

The aim of the work is achieved by performing the following tasks:

- to study the existing types of cyberthreats, to identify those that can be detected by analyzing traffic; to study the characteristics and structures of such threats;
- to familiarize yourself with existing security systems and algorithms that use traffic analysis to detect threats;
- from among the types of threats and methods of statistical analysis, machine learning, and artificial neural networks selecting those that will be used in further research;
- modeling, design and create software that will allow analyzing traffic in real time to detect cyberthreats;
- testing the created software on historical datasets, using cyberattack simulation software and in a real local network where a DDoS attack is simulated;
- drawing conclusions about the quality and practical application of the developed software.

2. TYPES OF ATTACKS AND RESEARCH TOOLS

The types of attacks [1] that can be identified through traffic analysis are shown in Figure 1. The figure shows three levels of grouping of attack types.

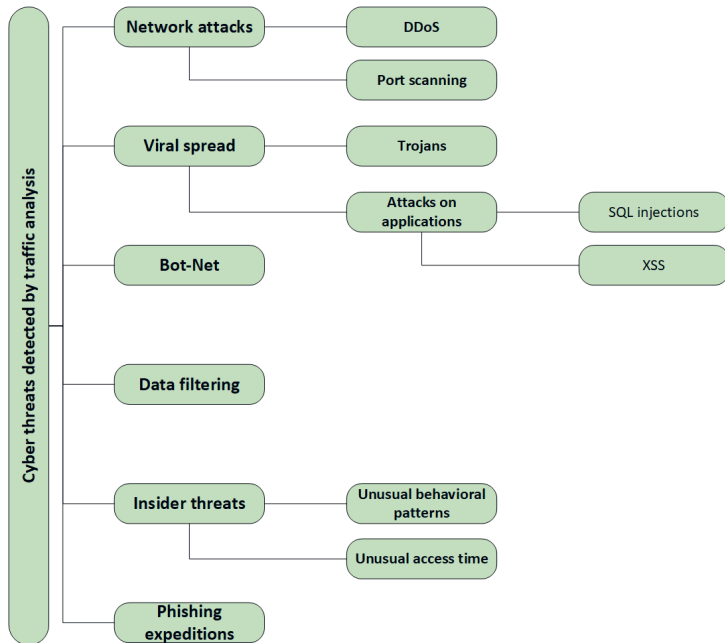


Fig. 1. Types of attacks that can be detected by analyzing traffic

To protect against dedicated cyberattacks, it is advisable to consider two types of software [1], the second of which is an extension of the first:

- 1) IDS is a system or software designed to monitor networks and systems for malicious activity or violations of security policies.
- 2) IPI is an extension of the previous type of system that not only detects sub-advanced activities but also takes measures to block or prevent them.

Both systems are important for providing proactive protection against various cyberthreats, ensuring early detection and response to potential intrusions.

In Figure 2 categorizes the mathematical models most commonly used in traffic analysis.

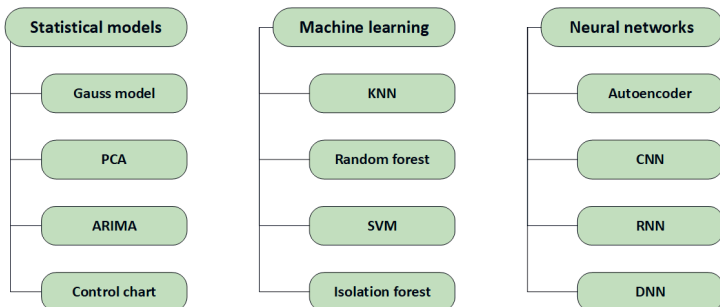


Fig. 2. Types of mathematical models used for traffic analysis

Based on the need to compare different types of information to be analyzed, as well as the effectiveness of different types of basic models and their ensembles, we will distinguish three types of information: information about traffic packets; time series describing traffic; and protocol data. We will use models from different groups shown in Figure 2 to analyze them.

The ARIMA and RNN model groups will be used to study, model, and search for anomalies in time series. PCA, Random Forest and CNN-based classifier models will be used to analyze traffic characteristics. We will detect anomalies in the protocol data using Isolation Forest and Autoencoder.

3. STUDY OF EXISTING DATASETS

The practical part of the research, as stated in the research task, consists of three stages: analysis of publicly available datasets, simulation of attacks using specialized software, and simulation of an attack in a real local network.

The analysis of available datasets is the most important part of the research in terms of building and analyzing model behavior, as it allows us to analyze a large amount of collected real traffic data that is reliable, diverse, and allows us to identify the specifics of the information to be worked with. Specialized software and real-time attack simulations do not allow for such diverse and comprehensive information compared to the information collected by researchers over long periods of time and undergoing certain preparatory stages for ease of further analysis.

Despite their diversity and volume, not all commonly used datasets can be used to achieve the research objectives. For example, to use time series analysis models, any dataset requires certain transformations; for traffic analysis by classification, KDD-99 (NSL-KDD), UNSW-NB15 and CAIDA DDoS Attack 2007 are most suitable, and for detecting anomalies in protocol data, KDD-99 (NSL-KDD), UNSW-NB15 and CICIDS2017 are most useful. Therefore, it is advisable to pay the most attention to the modified KDD-99 datasets, including NSL-KDD, and UNSW-NB15, using CAIDA DDoS Attack 2007 for training to detect DDoS attacks, and CICIDS2017 for anomaly detection.

The KDD Cup 1999 Data dataset is a standard computer security assessment dataset used in intrusion and network traffic anomaly detection tasks. It contains a wide range of simulated attacks, such as buffer overflows, data theft, and other types of cyberattacks, in the context of network traffic. This dataset was first used in the 1999 KDD Cup competition, which was one of the first significant competitions in the field of data analysis and cyberattack detection.

Despite the dataset's certain obsolescence, primarily due to the evolution of attack methods, its analysis, and especially its modifications, should not be neglected, because it is well studied and because of the availability of modified versions aimed at eliminating the main problems of the original version.

The dataset consists of more than 1M unique records and contains 42 rows. The target variable is the type of attack – 22 attacks belonging to 4 groups. Also, the attack type has a marker – normal, which means a normal traffic packet. The grouping of attacks is shown in Table 1.

Table 1. Types of attacks and their groups

Attack type	Description	Attack name
DDoS	denial of service	back, land, neptune, pod, smurf, teardrop
R2L Remote to Local	unauthorized access from a remote computer	ftp_write, guess_passwd, imap, multihop, phf, spy, warezclient, warezmaster
U2R User to Root	unauthorized access to the privileges of the local super user (root)	buffer_overflow, loadmodule, perl, rootkit
Probe	observations and other studies	IPsweep, nmap, portsweep, satan

The first and most obvious problems of the dataset are the large number of features and the imbalance of classes. The latter is illustrated by the diagram in Figure 3.

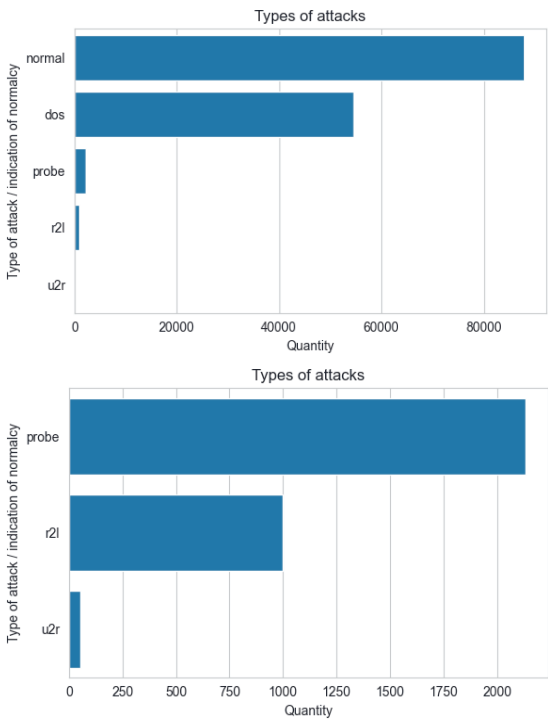


Fig. 3. Number of attacks by type

A modification of the dataset is NSL-KDD, a more balanced resampling of KDD-99, which focuses on examples that are likely to be missed by classifiers trained on the basic KDD-99. But the biggest drawback of the KDD-99 dataset is its outdated context – the types and nature of the attacks it describes. Nevertheless, it is an important milestone in traffic analysis.

Building classifiers on a transformed dataset while preserving the number of features allows us to build classifiers [2–7] that have excellent accuracy.

Based on the results of the metrics comparisons, we argue that each of the classifiers, both binary and multiclass, exhibits high prediction accuracy, demonstrating high F1-values on both training and test samples. Given this, we can conclude that the task of improving classification accuracy is no longer a priority. This is especially evident in the context of limited computing resources, where high computing speed is more relevant.

Thus, the focus in working with models has shifted to optimizing the use of resources, i.e., finding ways to reduce computational complexity without significant loss in forecasting accuracy. To this end, we have considered, among other things, reducing the dimensionality of the dataset using dimensionality reduction methods.

The principal component analysis for this dataset leads to the conclusion that not all features are equally important for classification [5].

The importance of reducing the number of features is explained by the fact that reducing the number of features means increasing the speed of data analysis, which is one of the decisive factors in real-time analysis.

The second of the main datasets is UNSW-NB15, developed for intrusion detection and network traffic analysis tasks by the University of New South Wales (Australia). UNSW-NB15 covers a certain number of types of modern attacks and normal network traffic, which makes it a good choice for building and testing traffic analysis systems. However, due to certain drawbacks, including less diversity of attacks, poorer documentation and study, and balance issues, it should not be used as the sole basis for training, but should be studied alongside the other datasets selected in the current section.

4. SYSTEM ARCHITECTURE, BUILDING A DATA COLLECTION AND ANALYSIS CLUSTER

On the one hand, machine learning and neural networks require a lot of computing power, especially when it comes to processing data tables containing hundreds of thousands of rows and dozens of columns. On the other hand, the practical application of the software being developed (Fig. 4) directly depends on its resource requirements: lower resource requirements will provide wider application. Therefore, it is advisable to distinguish between such processes as collecting data for training models and using existing large-scale datasets for training, the process of training models that are created, and the process of operating trained models.

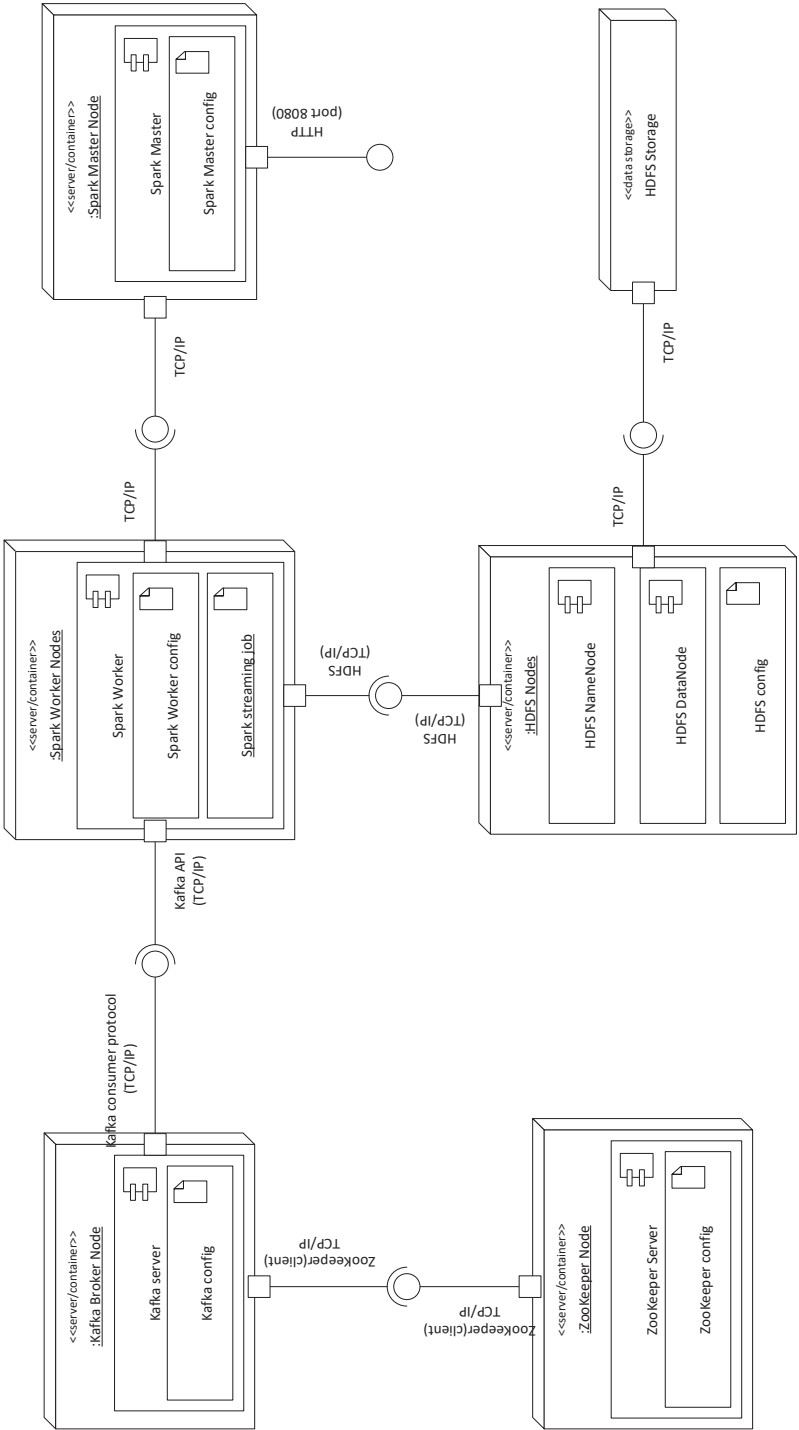


Fig. 4. Diagram of the data collection cluster

Spark data cluster with Spark Streaming and Hadoop extension is used for streaming data collection and analysis of existing datasets, Google cloud services are used for data analysis and model training, where graphic cores are used for computing when technically possible (Tensorflow is focused on using GPUs at the same time, when Scikit-learn and XGBoost are focused on the use of the central processor), a Raspberry Pi 4 with 4 GB of RAM and a processor clock speed of 1.5 GHz.

The created system for collecting network traffic data, which is a necessary part of the practical implementation of the software, includes:

- Filebeat, Fluentd as log collection agents on servers, routers and firewalls;
- Apache Kafka for collecting information from agents;
- Spark streaming for aggregation and filtering of collected data;
- Hadoop Distributed File System (HDFS) for storing collected data;
- Apache Spark for analyzing the collected data and preparing data for training mathematical models and artificial neural networks;
- Apache Zookeeper to coordinate and synchronize data cluster components.

Of course, such a system can be used only when collecting its own information for analyzing network traffic, or its use is advisable when maintaining a local network that includes 10+ computers and is characterized by intensive and diverse traffic. Such a cluster of information collection and analysis will allow, among other things, to update trained mathematical models.

As an alternative, as mentioned above, it is possible to use traffic analysis software with trained models on a low-power device. Therefore, for this scenario, the minimum required window size is also determined, which is about 60 seconds. Data for this period is sufficient to detect short-term attacks.

5. CONCLUSIONS

The developed methods and algorithms for detecting cyberthreats based on the analysis of network traffic using artificial intelligence and machine learning have proven to be highly effective. The use of statistical analysis, machine learning ensembles, and neural networks allows detecting non-standard behavioral patterns and anomalies that may indicate cyberattacks. The results of the study show that despite the high level of classification accuracy, the main problem is ensuring computing speed in conditions of limited computing resources. Thus, the relevance is shifting towards optimizing computational processes with minimal loss of forecasting accuracy.

The main goal of optimization is to reduce the computational complexity of models, which will allow for fast processing of large amounts of data and timely response to potential threats. For this purpose, dataset dimensionality reduction techniques such as principal component analysis (PCA) can be used. Developing software that operates in real time and can adapt to changing network conditions is a key aspect that will provide more effective protection against cyberattacks for different types of devices.

REFERENCES

- [1] Regalado D., Harris S., Harper A., Eagle C., Ness J., Spasojevic B., Linn R., Sims S., *Gray Hat Hacking: The Ethical Hacker's Handbook*, 4th ed., McGraw Hill, 2022.
- [2] Chen T., Guestrin C., *XGBoost: A Scalable Tree Boosting System*, [in:] *KDD'16: Proceedings of the 22nd ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining*, Association for Computing Machinery, New York 2016, pp. 785–794, <https://doi.org/10.1145/2939672.2939785>.
- [3] Hu T., Song T., *Research on XGboost academic forecasting and analysis modelling*, Journal of Physics: Conference Series, vol. 1324, no. 1, 2019, 012091, <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1324/1/012091>.
- [4] Ke G., Meng Q., Finley T., Wang T., Chen W., Ma W., Ye Q., Liu T.-Y., *LightGBM: A Highly Efficient Gradient Boosting Decision Tree*, [in:] von Luxburg U. et al. (eds.), *31st Annual Conference on Neural Information Processing Systems (NIPS 2017), Long Beach, California, USA, 4–9 December 2017*, Advances in Neural Information Processing Systems, 30, Curran Associates, Red Hook 2017, pp. 3147–3155, https://proceedings.neurips.cc/paper_files/paper/2017/file/6449f44a102fde848669bdd9eb6b76fa-Paper.pdf [access: 5.12.2023].
- [5] Richert W., Coelho L.P., *Building Machine Learning Systems with Python*, Packt, 2013.
- [6] Teoh T.T., Rong Z., *Artificial Intelligence with Python*, Machine Learning: Foundations, Methodologies, and Applications, Springer, Singapore 2022, <https://doi.org/10.1007/978-981-16-8615-3>.
- [7] Jones H., *Neural Networks: An Essential Beginners Guide to Artificial Neural Networks and Their Role in Machine Learning and Artificial Intelligence*, CreateSpace Independent Publishing Platform, 2018.

Julia Piestrzyńska*, Kinga Firmanty*

JUST IN BLAST – VR TRAINING – WYKORZYSTANIE TECHNOLOGII VR W GÓRNICTWIE I PRZEMYŚLE CIĘŻKIM DO PROWADZENIA SZKOLEŃ

Just in blast – VR training to studencki projekt zrealizowany w ramach grantu rektora AGH 2023 przez koło naukowe SKALNIK. Głównym założeniem projektu było stworzenie szkolenia w wirtualnej rzeczywistości VR (*virtual reality*) z zakresu techniki strzałowej. Materiał został nagrany na terenie Holcim Polska (dawniej Lafarge) Kopalni Dolomitu „Radkowice” we współpracy z firmą SSE Polska latem 2023 roku, kamerami szerokokątnymi 360°. Pozyskany materiał został odpowiednio wyselekcjonowany oraz przygotowany pod dalsze działania, które docelowo doprowadziły do montażu i stworzenia aplikacji w standardzie VR. Całość projektu ma na celu popularyzowanie wśród szerszego grona odbiorców zagadnień z dziedzin nauk górniczo-geologicznych, w szczególności w zakresie techniki strzałowej oraz górnictwa odkrywkowego. Aplikacja wraz ze szkoleniem mogą być użytkowane na każdym urządzeniu elektronicznym wspomaganym systemami operacyjnymi takimi jak Windows, MacOS czy Android, co umożliwia odbycie szkolenia nie tylko z wykorzystaniem okularów do wirtualnej rzeczywistości, ale również na komputerze stacjonarnym, tablecie czy smartfonie.

JUST IN BLAST – VR TRAINING – USING VR TECHNOLOGY IN MINING AND HEAVY INDUSTRY TO CONDUCT TRAINING

Just in blast – VR training is a student project carried out under the AGH 2023 Rector’s grant by SKALNIK research group. The main idea of the project was to create a virtual reality (VR) training in blasting technology. The footage was recorded on the premises of Holcim Poland (formerly Lafarge) Dolomite Mine “Radkowice” in cooperation with SSE Poland in the summer of 2023, with 360° wide-angle cameras. The acquired material was properly selected and prepared for further activities, which ultimately led to the assembly and creation of a VR application. The whole project is aimed at popularizing issues in the fields of mining and geological sciences, particularly in the field of blasting technology and surface mining, to a wider audience. The application along with the training can be used on any electronic device supported by operating systems such as Windows, macOS or Android, which makes it possible to take the training not only with virtual reality glasses, but also on a desktop computer, tablet or smartphone.

* AGH Akademia Górniczo-Hutnicza, Wydział Inżynierii Lądowej i Gospodarki Zasobami, Koło Naukowe Górnictwa Odkrywkowego SKALNIK.

1. WSTĘP

Wykorzystanie nowoczesnych technologii obserwowane jest już praktycznie w każdym aspekcie życia. Nowoczesne technologie podnoszą jego jakość, usprawniają planowanie pracy, przyczyniają się do kontroli, oceny czy optymalizacji procesów technologicznych. Na przestrzeni ostatnich lat technologia wirtualnej rzeczywistości poza strefą gier i szeroko pojętej rozrywki zagościła na dobre także w sektorze przemysłu ciężkiego, stając się uzupełnieniem szkoleń przeprowadzanych w sposób stacjonarny oraz wsparciem w procesie rekrutacji na różnego rodzaju stanowiska.

Wirtualna rzeczywistość (*virtual reality*) polega na przeniesieniu przestrzeni, przedmiotów i akcji ze świata realnego do świata wirtualnego, gdzie bazuje się na trzech ludzkich zmysłach – wzroku, słuchu i dotyku, które dodatkowo potęgują wrażenie rzeczywistych odczuć. Technologia ta w ostatnich latach mocno się spopularyzowała i jest coraz częściej wykorzystywana w wielu dziedzinach życia oraz nauki, np. w edukacji jako narzędzie szkoleniowe, do wspomagania procesów przyswajania i utrwalania oraz weryfikacji zdobytej wiedzy.

Roboty strzałowe są podstawową metodą urabiania skał w górnictwie odkrywkowym. Ponadto znajdują swoje zastosowanie w innych branżach inżynierskich (budownictwo). Na jakość wykonywanych robót strzałowych wpływa wiele czynników, m.in. skład i dobór odpowiednich materiałów wybuchowych, sposób inicjacji (elektryczny, nieelektryczny, elektroniczny), zastosowany schemat opóźnień milisekundowych detonacji ładunków. Istotnym elementem jest również samo przygotowanie miejsca pod wykonywanie robót strzałowych – zaprojektowanie siatki wierceń otworów strzałowych.

Biorąc pod uwagę wszystkie najważniejsze cechy, należy podkreślić, że technika strzałowa jest zagadnieniem bardzo złożonym, dodatkowo obciążonym dużym ryzykiem. W odpowiedzi na przedstawione problemy koło naukowe SKALNIK podjęło się stworzenia kompleksowego szkolenia z zakresu robót strzałowych, które w sposób jasny, czytelny i bezpieczny wyjaśnia osobom szkolonym kwestie dotyczące najważniejszego procesu w kopalni odkrywkowej.

Wirtualna rzeczywistość jako narzędzie służące do zdobywania wiedzy na temat procesów technologicznych w kopalni odkrywkowej była już w przeszłości wykorzystywana [1]. Projekt *Just in blast – VR training* zwraca jednak uwagę na proces podstawowy, którym jest urabianie skał.

Tworzenie i wdrażanie szkoleń w zakładach pracy z wykorzystaniem technologii VR przynosi wiele korzyści – zarówno zakładowi pracy, jak i uczestnikom szkolenia. Główne zalety, które można wyróżnić, są następujące: możliwość dostarczenia realistycznych doświadczeń dzięki zaangażowaniu w szkolenie zmysłu wzroku, słuchu i dotyku; przeprowadzenie szkolenia w kontrolowanych i bezpiecznych warunkach, które stanowią odwzorowanie potencjalnie niebezpiecznych sytuacji; dostępność i elastyczność realizacji szkolenia dzięki możliwości przeprowadzenia go w dowolnym miejscu i czasie. Nieumiejętna detonacja materiałów wybuchowych może spowodować duże zagrożenie dla służby strzałowej, otoczenia i sprzętu (rys. 1).



Rys. 1. Nagranie z drona wyświetlające się w trakcie ostatniego etapu szkolenia (odstrzału), prezentujące wygląd detonacji poprawnie zaprojektowanych i wykonanych robót strzałowych

Z perspektywy uczestników ogromne znaczenie ma możliwość realizacji szkolenia w dowolnym tempie, które dostosowane jest do ich potrzeb i stanu wiedzy. Szkolenie VR może być zatem dopasowane do przyszłego użytkownika. Wykreowane i skonstruowane mogą być spersonalizowane scenariusze i poziomy trudności. Istotną rolę odgrywa śledzenie postępów i ocena – uczestnik szkolenia może na bieżąco analizować raporty swoich postępów w przyswajaniu wiedzy (rys. 2).



Rys. 2. Wygląd końcowego ekranu wyświetlającego się użytkownikowi w celu podsumowania wyników szkolenia

Zostaje wyeliminowana konieczność zapewnienia i wynajęcia fizycznych przestrzeni szkoleniowych. Co więcej, doświadczenie pokazuje, że interaktywne elementy pozwalają na lepsze zapamiętywanie treści (rys. 3).



Rys. 3. Przypominanie użytkownikowi w trakcie szkolenia o zasadach BHP

Korzystanie z technologii wirtualnej rzeczywistości staje się coraz powszechniejsze w dziedzinie edukacji. Autorka artykułu *Wirtualna rzeczywistość w edukacji. Analiza opinii nauczycieli na temat wykorzystania technologii VR w edukacji szkolnej* [2] przekonuje, że 70,5% polskich nauczycieli deklaruje brak okularów VR w szkole, za to 61,2% polskich nauczycieli stwierdza, że dzięki VR można doświadczyć rzeczy, które nie byłyby osiągalne w innych warunkach.

Osoby poddane ankietyzacji [3] związanej ze szkoleniami BHP i technologią VR w sektorze budownictwa, a zatem w branży mającej wiele wspólnych cech z górnictwem, najczęściej podkreślali następujące potencjalne korzyści z przeprowadzenia szkoleń z wykorzystaniem VR w obszarze BHP: „większe zaangażowanie uczestnika szkolenia – w porównaniu do tradycyjnych wykładów [...]; uczenie poznawcze i behawioralne w jednym [...]; bezpieczeństwo” [3, s. 140].

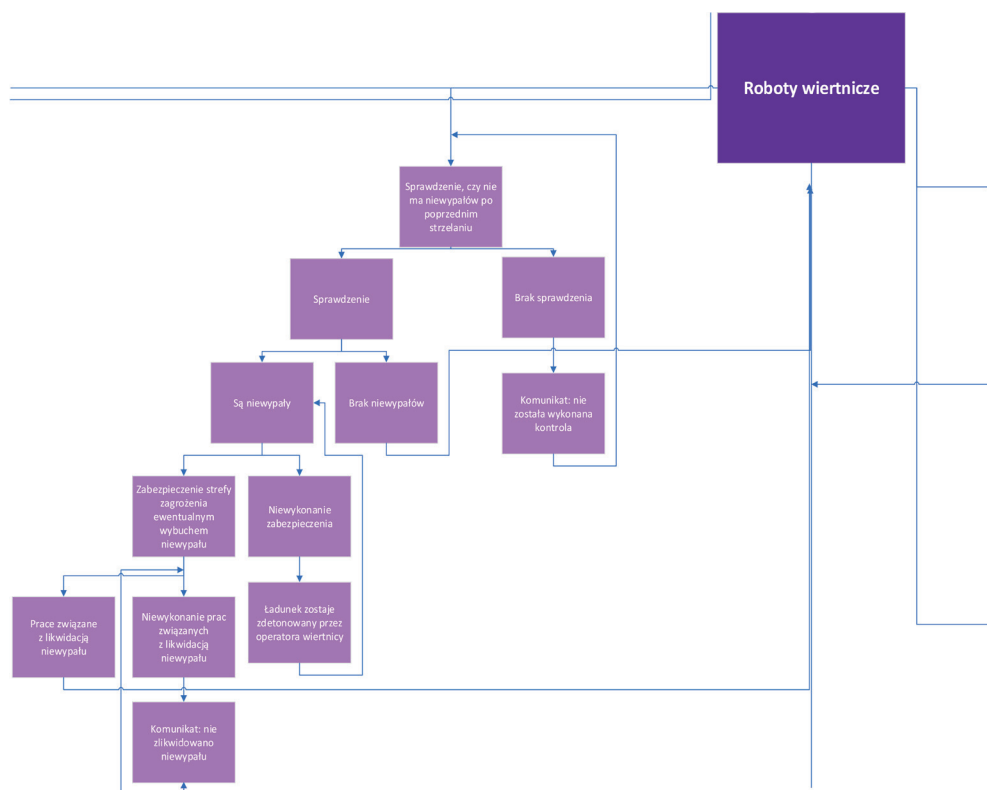
Wirtualna rzeczywistość okazuje się niezwykle przydatna w sytuacji tak niespodziewanych zjawisk jak pandemia COVID-19, w kontekście ekologii czy ograniczenia kosztów związanych z wynajmem wieloprzestrzennych lokali na cele sprzedażowe, o czym między innymi wspomina dr hab. Anna Pyrkosz z Akademii Sztuk Pięknych im. Jana Matejki w Krakowie. Autorka publikacji *Wirtualna rzeczywistość – realne korzyści* [4] podnosi kwestię występowania interaktywnych przymierzalni i zauważa zaletę minimalizacji kosztów najmu lokalu w kontekście przeniesienia się handlu do przestrzeni internetowej.

2. METODYKA PRACY PRZY WYKONANIU PROJEKTU

Strategicznym celem projektu *Just in blast – VR training* było opracowanie szkolenia z zakresu techniki strzelniczej z wykorzystaniem technologii wirtualnej rzeczywistości. Celami pośrednimi, które zostały osiągnięte dzięki realizacji projektu były:

- zapoznanie się z właściwościami materiałów wybuchowych i sprzętu strzałowego oraz zasadami prawidłowego i bezpiecznego posługiwania się nimi w technice cywilnej;
- zwiększenie świadomości dotyczącej znaczenia surowców skalnych dla gospodarki;
- wykonanie materiałów edukacyjnych służących do prowadzenia warsztatów tematycznych oraz pokazów.

Punktem wyjścia do stworzenia aplikacji było opracowanie scenariusza uwzględniającego aspekty regulowane prawnie (rys. 4), a także zarówno dobre, jak i złe praktyki z zakresu robót wiertniczo-strzałowych.



Rys. 4. Fragment schematu blokowego tworzącego scenariusz robót wiertniczo-strzałowych

Na podstawie wiedzy zdobytej podczas pierwszego z wyjazdów do Kopalni Dolomitu „Radkowice” opracowano scenariusz z zakresu projektowania oraz wykonawstwa robót wiertniczo-strzałowych. Kolejnym, bardzo ważnym elementem było zgromadzenie materiału

z kamer sferycznych 360° (rys. 5). Ich zasada działania opiera się na rejestrowaniu jednocześnie obrazu z dwóch kamer, który łączony jest w sposób umożliwiający zatarcie granicy kadru jednej i drugiej kamery. Późniejsza edycja w przeznaczonych do tego typu obróbek programach komputerowych pozwala na podgląd, edytowanie oraz eksportowanie obrazu w zakresie 360°. Gromadzenie materiału do projektu *Just in blast – VR training* odbywało się przy wykorzystaniu dwóch kamer Insta 360 One X2 oraz jednej kamery Insta 360 One R. Przygotowany oraz odpowiednio wyeksportowany materiał został następnie wprowadzony do programu 3DVista Virtual Tour, który umożliwia tworzenie wirtualnych spacerów i szkoleń.



Rys. 5. Nagrywanie materiału do szkolenia kamerami sferycznymi (360°) na terenie Kopalni Dolomitu „Radkowice” (fot. K. Firmanty)

3. TWORZENIE APLIKACJI W 3DVISTA VIRTUAL TOUR

Pakiet programów licencyjnych 3DVista, zawierający program do tworzenia wirtualnych spacerów oraz szkoleń, posłużył jako medium do wykonania aplikacji. Pierwszym i najważniejszym krokiem było wykonanie selekcji zebranego materiału i wyeksportowanie go w odpowiednim formacie tak, aby nadawał się do pracy w programie (rys. 6).



Rys. 6. Film 360° obrazujący proces mierzenia otworu strzałowego na etapie przygotowania robót strzałowych

Kolejnym istotnym krokiem było ustalenie odpowiedniego interfejsu graficznego aplikacji, ekranu ładowania szkolenia oraz przejść graficznych, pozwalających na rozdzielenie poszczególnych etapów podczas całego procesu robót strzałowych (rys. 7, 8).



Rys. 7. Ekran startowy ładującego się szkolenia



Rys. 8. Interfejs graficzny we wnętrzu aplikacji

Program 3DVista Virtual Tour umożliwia dodawanie również przestrzennych modeli 3D, które w ciekawy sposób pomagają urozmaicić szkolenie. Jako przykład wygenerowano prosty model pomieszczenia, w którym umieszczono stanowisko z komputerem. Scena ta ma obrazować przetwarzanie zebranych danych z przestrzennego skanowania, które są niezbędne na etapie projektowania robót strzałowych (rys. 9).



Rys. 9. Model 3D pomieszczenia w aplikacji.

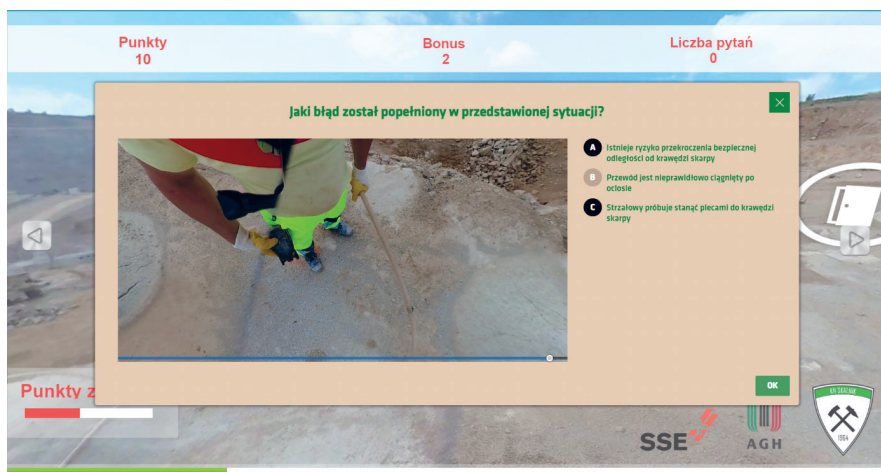
Tu użytkownik zaczyna projektowanie robót strzałowych, rozwiązując kolejne zadania

Poszczególne sceny zostały połączone odpowiednimi przejściami za pomocą tak zwanych hotspotów, które również pozwalają na umieszczenie w każdej scenie ikon przekierowujących użytkowników do kolejnych pytań, filmów lub scen. Najczęściej jako podstawę danej sceny wykorzystano panoramy (zdjęcie w formacie 360°), tak jak pokazano na rysunku 10.



Rys. 10. Jedna z interaktywnych panoram 360° z ikonami zawierającymi pytania

Pytaniom zamieszczonym jako hotspoty należało przypisać odpowiednią akcję, którą mają wykonać w programie, tak aby po kliknięciu na ich ikonę rozpoczął się proces szkolenia i ukazał się ekran z pytaniem, odpowiedziami oraz filmem lub zdjęciem nawiązującym do treści pytania (rys. 11–13).



Rys. 11. Przykładowy wygląd ekranu z otwartym pytaniem



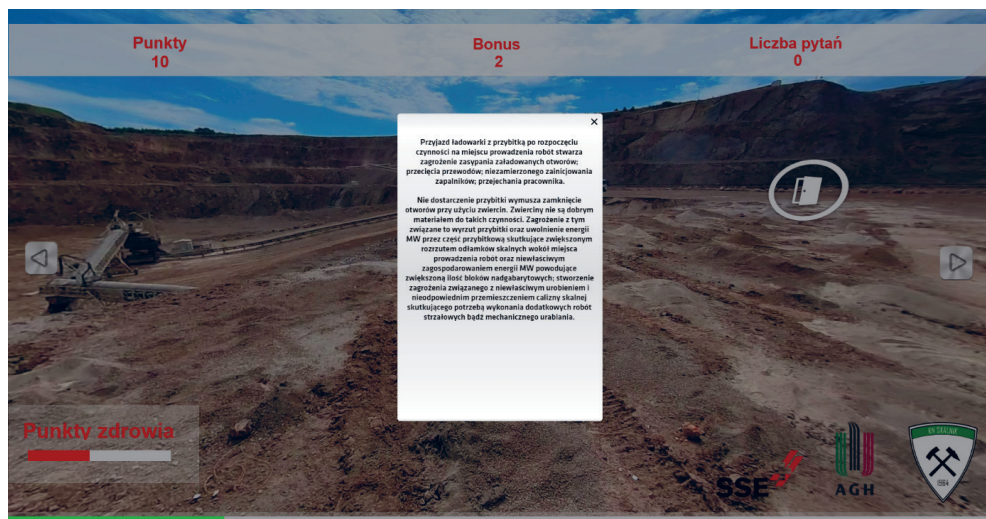
Rys. 12. Pytania wzbogacone dodatkowo o filmy 360° lub panoramy nawiązujące do sytuacji przedstawionej w pytaniu



Rys. 13. Etap przygotowań do robót strzałowych i pytania z nim związane

Do każdego wariantu odpowiedzi można dodać w programie akcje przekierowujące użytkownika dalej w celu zagłębienia się w daną problematykę. Wykorzystano tę funkcję przy tworzeniu aplikacji, dzięki czemu po udzieleniu błędnej odpowiedzi użytkownikowi zostanie pokazany ekran z komunikatem (rys. 14) wyjaśniający dane zagadnienie lub w niektórych przypadkach wyjaśnienie będzie prezentowane w formie grafiki (rys. 15). W przypadku

udzielenia prawidłowej odpowiedzi przy bardziej problematycznych i trudniejszych kwestiach również ukazany zostaje ekran z uzupełnieniem informacji lub wyświetla się kolejne pytanie. W momencie zakończenia ścieżki użytkownik ponownie wraca do sceny, z której wybierał ikony z pytaniami, i decyduje, czy eksploruje scenę dalej, czy przechodzi do kolejnych etapów szkolenia.



Rys. 14. Ekran wyświetlający się po podaniu złej odpowiedzi lub po trudniejszych zagadnieniach, objaśniający i uzupełniający wiedzę, której wymagało pytanie



Rys. 15. Przykładowe dokumenty, z którymi użytkownik będzie miał styczność podczas realizacji robót strzałowych

4. PODSUMOWANIE

Stworzone szkolenie z zakresu techniki strzelniczej z wykorzystaniem technologii wirtualnej rzeczywistości przyczyniło się do wzrostu poziomu wiedzy studentów na temat właściwości materiałów wybuchowych, bezpiecznego posługiwania się nimi oraz projektowania siatek strzałowych w celu urobienia ośrodka skalnego, co stanowi podstawę przebiegu dalszych procesów technologicznych w kopalni odkrywkowej. Szkolenie jest chętnie wykorzystywane przez pracowników firmy strzałowej (rys. 16) zarówno w procesie rekrutacji, jak i w celu utrwalenia pozyskanej wcześniej wiedzy.



Rys. 16. Zdjęcie zespołu z koła naukowego SKALNIK odpowiedzialnego za nagrywanie materiału wraz z pracownikami firmy SSE Polska (fot. K. Firmanty)

Projekt przyczynił się do zwiększenia świadomości dotyczącej podstawowego procesu technologicznego pracy kopalni odkrywkowej. Istotnym aspektem, na który miał wpływ projekt, była promocja górnictwa odkrywkowego, Wydziału Inżynierii Lądowej i Gospodarki Zasobami (WILiGZ) oraz uczelni (AGH) w mediach społecznościowych i podczas różnego rodzaju wydarzeń edukacyjno-kulturowych. Opracowane materiały edukacyjne są ponadto używane przy prowadzeniu warsztatów tematycznych bądź pokazów.

Podziękowania

Publikacja powstała na podstawie zwycięskiego referatu prezentującego efekty projektu *Just in blast – VR training*, wygłoszonego podczas 64. Barbórkowej Konferencji Studenckich Kół Naukowych AGH. Podziękowania kierujemy do Pana dr. inż. Michała Patyka, opiekuna naukowego referatu.

LITERATURA

- [1] Pomykała R., Cybulski A., Klatka T., Patyk M., Bonieckal J., Kedzierski M., Sikora M., Juszcak J., Igras-Cybulska M., „*Put your feet in open pit*” – a WebXR Unity application for learning about the technological processes in the open pit mine, [w:] 2022 IEEE conference on Virtual Reality and 3D user interfaces abstracts and Workshops (VRW): 12–16 March 2022, virtual event: proceedings, IEEE, Piscataway 2022, s. 493–496, <https://doi.org/10.1109/VRW55335.2022.00110>.
- [2] Ignaciuk M., *Wirtualna rzeczywistość w edukacji. Analiza opinii nauczycieli na temat wykorzystania technologii VR w edukacji szkolnej*, Ars Educandi, t. 19, nr 19, 2023, s. 73–86, <https://doi.org/10.26881/ae.2022.19.05>.
- [3] Szóstak M., Napiórkowski M., *Analiza możliwości zastosowania wirtualnej rzeczywistości w szkoleniach BHP w budownictwie*, Przegląd Budowlany, r. 93, nr 9–10, 2022, s. 138–140.
- [4] Pyrkoś A., *Wirtualna rzeczywistość – realne korzyści*, inAW Journal – Multidisciplinary Academic Magazine, t. 2, nr 1, 2021, s. 107–121.

Klaudia Proszowska*

PERCEPCJA WYKORZYSTANIA TECHNOLOGII DEEPAKE W MATERIAŁACH WIDEO WŚRÓD STUDENTÓW

Niniejszy artykuł skupia się na opiniach dotyczących wykorzystania technologii deepfake w materiałach wideo uznawanych za szczególnie niebezpieczne w kontekście rozpowszechniania fałszywych treści. Badanie pomogło określić, jak studenci rozumieją i oceniają deepfaki oraz jak ich opinia dotycząca szkodliwości (na poziomie społeczeństwa, osoby przedstawionej w materiale oraz osoby oglądającej) i konieczności oznaczenia fałszywości materiału zależy od wyróżnionych pięciu kategorii deepfake'ów: projektu artystycznego, satyry, materiału propagandowego, fake newsa oraz materiału pornograficznego. Sprawdzono również, czy te opinie są zależne od stopnia znajomości technologii. Badanie pokazało ogólnie negatywny stosunek do deepfake'ów, a za najbardziej szkodliwe na wszystkich płaszczyznach uznaje się materiały pornograficzne, projekty artystyczne z kolei – za najmniej szkodliwe. Pomimo nieznacznych różnic między kategoriami materiałów deepfake respondenci opowiadali się zwykle za ich czytelnym oznaczaniem. Znajomość technologii raczej nie ma bezpośredniego wpływu na postawy ankietowanych, chociaż osoby deklarujące jej lepszą znajomość uważają deepfaki za nieco bardziej przyszłościowe i interesujące, a materiały pornograficzne za mniej szkodliwe.

THE PERCEPTION OF DEEPAKE TECHNOLOGY IN VIDEO MATERIALS AMONG UNIVERSITY STUDENTS

This research focuses on public opinion regarding the use of deepfake technology in video materials; materials considered particularly dangerous in terms of fake content dissemination. It studies how students understand and evaluate deepfakes and their opinion regarding harmfulness of deepfakes at three levels: at the level of society, for the person presented in the material and for the viewer. The research investigates also whether deepfakes shall be clearly marked as fake. Deepfakes were considered in five categories: as an art project, a satire, propaganda material, fake news or a pornographic material. The link to the user's proximity to technology was also explored. Generally, the attitude towards deepfakes was rather negative, with pornographic materials seen as the most harmful, and artistic projects – as the least. Regardless of the category, most respondents were in favor of clear labels on deepfake materials. Proximity to technology does not have a direct impact on the declared attitudes, although people closest to technology consider pornographic deepfake materials as less harmful, and general deepfake technology to be slightly more interesting and relevant in the future.

* AGH Akademia Górniczo-Hutnicza, Wydział Humanistyczny.

1. WSTĘP

Stworzyć wizerunek osoby, która nigdy nie istniała, wstawić twarz słynnego aktora do filmów, w których nigdy nie zdecydowałby się wystąpić, usłyszeć głos dowolnej osoby wypowiadającej nieprawdopodobne kwestie – to tylko niektóre z możliwości technologii deepfake, która opierając się na uczeniu maszynowym i dowolnym, wybranym przez twórcę materiale oraz bazie danych, tworzy materiały audiowizualne i tekstowe o każdej tematyce.

Technologia ta zyskała na popularności w 2017 roku, kiedy to internet podbiły sfałszowane filmy pornograficzne wykorzystujące wizerunki celebrytek. Od tego czasu deepfake jest przedmiotem wielu rozważań w kontekście stosowania tej technologii, a zwłaszcza płynących z niej zagrożeń i korzyści. Pomimo skali zagrożeń stosunkowo niewiele państw reguluje prawnie publikację deepfake'ów, a tym samym możliwą ochronę potencjalnych ofiar takich materiałów. Każda osoba publikująca treści zawierające własny wizerunek może stać się bohaterem deepfake'u, a zależnie od charakteru stworzonego materiału – również jego ofiarą. W momencie pisania tego artykułu prawo nie chroni osób i ich wizerunków wykorzystywanych do tworzenia treści deepfake. Dlatego też rozpowszechnienie i forma materiałów deepfake zależą głównie od internautów – ich potencjalnych konsumentów, od ich opinii i przyzwolenia na powstawanie i rozpowszechnianie różnych rodzajów materiałów deepfake.

Z tego powodu przedmiotem niniejszych badań¹ jest opinia studentów na temat materiałów wideo stworzonych za pomocą technologii deepfake. W porównaniu z innymi rodzajami treści deepfake materiały wideo niosą ze sobą podwyższony stopień ryzyka, zwłaszcza w czasach postępującej dezinformacji. Studenci zaś należą do jednej z grup wiekowych, które publikują najwięcej treści w internecie, a ze względu na swój wiek mogą być traktowani jako osoby kształtujące przekonania dotyczące tego, jakie treści są odpowiednie do publikowania, a jakie nie.

Na potrzeby tego badania stworzono pięć kategorii wideo będących deepfake'ami: projekt artystyczny, satyra, materiał propagandowy, fake news oraz materiał pornograficzny. Badanie ma pokazać, czy postrzegana szkodliwość deepfake'ów w trzech płaszczyznach (dla społeczeństwa, osoby przedstawionej w materiale oraz osoby oglądającej materiał) różni się w zależności od treści materiału, czy może jednak ich szkodliwość (lub jej brak) jest dla nich wszystkich jednakowa. W badaniu poruszana jest również kwestia istotności oznaczania deepfake'ów jako materiałów fałszywych i tu podobnie – ma ono zweryfikować, czy konieczność oznaczania takich materiałów jest taka sama dla wszystkich wyróżnionych kategorii. Badanie ma też wykazać, czy opinie respondentów zależą od ich płci, studiowanego kierunku (specyfiki oraz stopnia) oraz ogólnie pojętego kontaktu z technologią.

2. PRZEGLĄD LITERATURY

Zgodnie z definicją, którą sformułowali Giles i inni [1], deepfake (DF) to jakikolwiek materiał cyfrowy, który został wytworzony z zastosowaniem metod uczenia maszynowego, gdzie szczególnie wykorzystuje się generatywne sieci antagonistyczne (GAN). Za początek DF

¹ Badania zostały przeprowadzone w ramach pracy licencjackiej autorki, a sam artykuł powstał na jej podstawie.

w internecie uważa się publikację sfałszowanych filmów pornograficznych z wykorzystaniem wizerunków celebrytek (m.in. Gal Gadot) w serwisie Reddit przez anonimowego użytkownika [2]. Od tamtego czasu DF znacznie się rozpowszechniły, a ich tematyka stała się bardziej różnorodna – od nieszkodliwych przeróbek popularnych filmów [3], do narzędzi służących dezinformacji [4]. Bazując na sposobie stworzenia DF, można wyróżnić kilka ich rodzajów, jednak wytworzony DF może przyjąć jedną z następujących postaci: graficzny, audio, wideo lub tekstowy [5].

W kontekście popularyzacji DF tematem wielokrotnie rozważanym były różne możliwości ich zastosowań i to, w jaki sposób wpłyną one na jednostki i całe społeczeństwo [5–7]. Tak samo jak w przypadku wielu technologii wśród zastosowań DF znajdują się te pozytywne, ale i te, które niosą za sobą zagrożenia. Beneficjentami technologii DF mają być sfery edukacji, szeroko rozumianej sztuki i sposobów ludzkiej ekspresji [6]. Wśród negatywnych skutków szczególnie widoczny jest podział na zagrożenia dla jednostek (m.in. wyłudzenia) i społeczeństwa ogólnie (m.in. pogorszenie stosunków międzynarodowych, ale też i tych wewnątrz państwa) [5, 6].

Jak zauważa Harris [7], w momencie rozpowszechnienia się technologii DF, kiedy głównym sposobem jej wykorzystania były filmy pornograficzne, prawo nie chroniło jej ofiar, jednak od tamtego czasu w kontekście prawnym dotyczących DF wiele się zmieniło – mimo tego, że przykładów aktów prawnych regulujących DF wciąż nie jest zbyt dużo, są kraje oraz związki, które zdają sobie sprawę z zagrożeń wynikających z tych materiałów i pracują nad regulacjami [5].

Dotychczasowe badania dotyczące różnych aspektów DF pokazują, jak istotna i aktualna jest problematyka związana z DF w formie audiowizualnej, w których przypadku negatywne skutki są widoczne nie tylko w sferze rozważań. Dobber i inni [8] badali wpływ DF w formie wideo na opinię małej społeczności o polityku i partii, którą reprezentuje. Poparcie dla samego polityka wśród badanych spadło, podczas gdy dla partii, którą reprezentuje – nie zmieniło się [8]. To pokazuje, jak istotne jest rozróżnienie skutków konkretnego materiału dla jednostki, której wizerunek jest wykorzystywany, oraz dla społeczności – wpływ danego materiału DF może się różnić na tych dwóch płaszczyznach.

Kolejnym z często badanych aspektów DF w formie wideo jest stopień rozpoznania nieprawdziwości materiału. Badania Vaccariego oraz Chadwicka [9] w tym nurcie pokazały, że szczególnie istotny jest odsetek osób, które są niepewne w ocenie prawdziwości materiału. Twórcy badania wnioskują, że sama ta niepewność jest negatywnym skutkiem DF – zmniejszają one zaufanie do mediów i informacji w nich przedstawionych [9].

Warto zwrócić uwagę na to, że jednym z najczęściej wymienianych skutków rozwoju i popularyzacji technologii DF jest właśnie dezinformacja [6]. Bazując na badaniach przeprowadzonych przez Sundar i innych [10], można stwierdzić, że to materiały wideo mogą najbardziej przyczynić się do rozpowszechniania dezinformacji. Z tego powodu to DF w formie wideo mogą być szczególnie istotne w badaniu szkodliwości materiałów stworzonych za pomocą tej technologii. DF mogą być jednak kojarzone także z humorystycznymi filmikami, gdzie np. niskiej jakości wizerunki polityków wypowiadają różne zabawne kwestie. Te skrajne, ale obecne w sieci przypadki pokazują, że każdy użytkownik internetu może mieć całkowicie różne doświadczenie z DF, a tym samym – opinie na ich temat.

Przytoczone badania pokazują, że technologia DF jest ogromnie złożonym zjawiskiem, a także że problematyka DF jest niezwykle istotna w kontekście przyszłości mediów w internecie oraz ich percepcji. Dlatego też przedmiotem niniejszego badania są opinie studentów na temat DF w formie wideo, ale również to, w jaki sposób studenci rozumieją sam termin DF. Ze względu na różny charakter i tematykę prezentowanych materiałów wideo DF badanie pokaże, czy opinia respondentów na temat technologii DF zmienia się ze względu na tę tematykę, a jeśli tak, to w jaki sposób. Oprócz tego studenci zostaną zapytani o to, DF o jakiej treści powinny być oznaczane przez ich autorów jako fałszywe.

3. OPIS BADAŃ

3.1. PODSTAWOWE POJĘCIA ANALIZY

W niniejszym badaniu materiały DF będą rozumiane jako materiały audiowizualne wytworzone za pomocą technik uczenia maszynowego pokazujące sytuacje, które nigdy się nie wydarzyły, w tym nieistniejące wypowiedzi osób, których wizerunek jest wykorzystany w materiale.

Materiały DF w formie wideo zostały podzielone na pięć kategorii ze względu na ich charakter, treść oraz cel ich stworzenia (tab. 1). Kategorie w poniższej klasyfikacji są nierozłączne, co sprawia, że jeden konkretny materiał może przynależeć do więcej niż jednej kategorii. Podział jest autorski i powstał na potrzeby analityczne, by móc lepiej zakwalifikować dane, szczególnie w przypadku badania zmian opinii studentów wobec wyszczególnionych rodzajów DF.

Tabela 1. Podział deepfake'ów na kategorie oraz ich definicje

Kategoria	Definicja
Projekt artystyczny	Materiał, który powstał przez wykorzystanie wizerunku osoby publicznej lub aktora i nie ośmiesza osoby przedstawionej
Satyra	Materiał, który powstał przez wykorzystanie wizerunku osoby publicznej lub aktora i ośmiesza osobę przedstawioną
Materiał propagandowy	Materiał propagujący konkretne wartości, które mają wpłynąć na myślenie odbiorców, ale jego celem nie jest propagowanie fałszywych informacji
Fake news	Materiał mający za cel rozpropagowanie fałszywych informacji i/lub treści
Materiał pornograficzny	Materiał, który powstał przez sfabrykowanie filmu pornograficznego z wykorzystaniem czyjegoś wizerunku bez zgody tej osoby

Podstawą do stworzenia tego podziału są m.in. rozważania Chesneya i Citron [6] na temat potencjalnego zastosowania DF, gdzie możliwości wykorzystania takiego typu materiałów podzielono ze względu na skutki, jakie za sobą niosą – pozytywne i negatywne. Warto zwrócić uwagę na to, że jest dużo więcej zauważalnych zagrożeń niż korzyści.

Ta dysproporcja widoczna jest również w opracowanej klasyfikacji – trzy z wyszczególnionych kategorii charakteryzuje widocznie szkodliwy cel wytworzonych treści. Mowa tutaj o satyrze (ośmieszającej osobę przedstawioną), fake newsach (rozprzestrzenianie fałszywych informacji) oraz filmie pornograficznym (wykorzystanie czyjegoś wizerunku do stworzenia materiału pornograficznego). W przypadku tego ostatniego trudno określić konkretny cel przyświecający autorowi, jednak bazując na rozważaniach dotyczących DF w tej sferze, można uznać, że celem często jest upokorzenie osoby przedstawionej czy wymuszenie jakichś zachowań tej osoby [7]. Pozostałe kategorie – projekt artystyczny i materiał propagandowy – mimo pozytywnego zabarwienia dalej mogą nieść za sobą negatywne skutki, które nie były przewidziane przez autora DF, dlatego można uznać ich charakter za niepewny (ani zdecydowanie pozytywny, ani zdecydowanie negatywny).

Oznaczanie materiałów DF w badaniu będzie rozumiane jako umieszczenie przez twórcę informacji o nieprawdziwych treściach widocznych w materiale. To oznaczenie powinno być w miejscu widocznym dla odbiorcy, np. w tytule lub opisie publikowanego materiału albo przekazywane za pomocą cyfrowego znaku wodnego. „Cyfrowy znak wodny” to termin określający metody wdrażania jakiejś informacji do jakiegokolwiek sygnału nośnego w sposób transparentny [11]. Dobrze wdrożony cyfrowy znak wodny pozwoli na oznaczenie materiału w taki sposób, że usunięcie znaku może nie być możliwe lub spowodować zniekształcenie materiału w widoczny sposób. To sprawia, że w momencie, w którym odbiorca spotyka się z materiałem nie u jego źródła, dalej ma świadomość m.in. o prawach autorskich [11], a w przypadku DF – że jest to materiał nieprawdziwy.

3.2. DOBÓR PRÓBY BADAWCZEJ

Osobami badanymi są studenci polskich uczelni. Według raportu Feliksiaka [12] dla CBOS każda osoba w wieku od 18 do 34 lat korzysta z internetu, a około 80% z nich ogląda w internecie różnego rodzaju materiały audiowizualne. Dla porównania w kolejnych grupach wiekowych odsetek osób oglądających wideo w internecie wynosi około 50% i mniej. Jest więc bardziej prawdopodobne, że osoby młode, m.in. studiujące, zetknęły się (świadomie lub nieświadomie) lub zetkną w przyszłości z DF w formie wideo. Jest to również najstarsze pokolenie, które w pełni korzysta z internetu, dlatego to ich opinia będzie istotna w kształtowaniu się norm publikacji treści w internecie. Ponadto wśród osób w wieku 18–34 lat blisko 50% deklaruje publikowanie w internecie zrobionych przez siebie zdjęć i filmów [12]. Przy założeniu, że część tych materiałów zawiera ich wizerunki, badana grupa jest najbardziej narażona na wykorzystanie przez kogoś ich wizerunków w DF w formie wideo, do których czasami potrzeba tylko jednego zdjęcia lub filmiku [13].

Techniczne wymagania związane z uczestnictwem w badaniu to możliwość odtworzenia i obejrzenia zawartych w badaniu DF w formie wideo oraz znajomość języka angielskiego w stopniu co najmniej podstawowym, co pozwala na zrozumienie słów wypowiedzianych w podanych materiałach.

3.3. TREŚĆ BADANIA

Badanie składa się z czterech materiałów wideo – każdy z nich reprezentuje jedną z kategorii analitycznych. W przypadku piątej kategorii – filmu pornograficznego – ze względów

etycznych zamiast materiału do obejrzenia umieszczone zostało pytanie projekcyjne, w którym respondent musiał wyobrazić sobie sytuację, w której natrafia na film pornograficzny ze wstawionym wizerunkiem osoby publicznej. Mimo zmiany formuły badania dla ostatniej kategorii jest ona istotna nie tylko ze względu na historię DF (ich popularność rozpoczęła się właśnie od sfalszowanych filmów pornograficznych [2]), ale również na niezwykle szkodliwy wpływ na osoby, których wizerunek wykorzystano [14].

Badanie zawiera następujące materiały:

- Projekt artystyczny: pierwsze wideo opublikowane przez konto Deeptomcruise w serwisie TikTok wykorzystujące wizerunek Toma Cruise’a. W trwającym 35 sekund materiale postać wykorzystująca wizerunek Toma Cruise’a wita się ze społecznością TikToka oraz odbija piłkę kijem golfowym. W treści materiału nie ma nic kontrowersyjnego ani też ośmieszającego Toma Cruise’a, co wpisuje się w założenia kategorii [15].
- Satyra: film opublikowany w serwisie YouTube przez użytkownika Marshall Artist o tytule *President Joe Biden’s magical pistachio story (deepfake AI)*. Wykorzystuje on wizerunek prezydenta Stanów Zjednoczonych Joe Bidena i opowiada historię o magicznej pistacji, która pomogła mu odnaleźć drogę w sklepie. Wideo stylizowane jest na fragment programu informacyjnego ze stopką „Breaking News”. Materiał można uznać za ośmieszający polityka ze względu na sens słów, które wypowiada, szczególnie biorąc pod uwagę środowisko, w którym się znajduje – tak jakby był w trakcie jakiegoś przemówienia [16].
- Materiał propagandowy: materiał wytworzony w ramach instalacji artystycznej *Spectre* Billa Postersa wykorzystujący wizerunek Marka Zuckerberga, który porusza kwestię wykorzystywania danych w celu przewidywania ludzkich zachowań [17]. Spośród innych materiałów pokazywanych w trakcie projektu *Spectre* ten został wybrany ze względu na rozpoznawalność osoby przedstawionej. Mimo tego, że materiał kwalifikuje się również jako projekt artystyczny, to jego treść ma zwrócić uwagę odbiorców na problemy prywatności w internecie oraz na to, na co mogą wpływać dane pozostawiane przez użytkowników internetu, dlatego spełnia kryteria materiału propagandowego.
- Fake news: DF przedstawiający fragment programu *Wolf News*, w którym prezenter mówi o częstotliwości strzelanin w Stanach Zjednoczonych, z dramatyczną muzyką w tle. Nie ma informacji, kto jest autorem tego DF, ale jest on przykładem wykorzystywania DF w kampaniach dezinformacyjnych – w tym wypadku organizacji wspierających rząd chiński przeciwko Stanom Zjednoczonym [18]. Materiał i jego treść ewidentnie mają za cel wpłynięcie na myślenie odbiorców przez rozpropagowanie fałszywych informacji.

Wymienione materiały wideo zostały wybrane również ze względu na ich dostępność oraz jakość: wyraźnie przedstawione postacie oraz dobra jakość dźwięku. Wszystkie DF są związane ze Stanami Zjednoczonymi – przedstawiane osoby są Amerykanami lub treść DF związana jest z tym krajem. Ponieważ osoby badane są studentami polskich uczelni, materiały mogą nie dotyczyć ich bezpośrednio, co pozwala zachować dystans – gdzie np. w przypadku DF przedstawiającego prezydenta Ukrainy [4] wyniki badań mogłyby być bardziej zradikalizowane, ze względu na możliwy pośredni lub bezpośredni wpływ treści oraz przedstawionych sytuacji na respondenta.

Badanie zostało zaprojektowane oraz przeprowadzone w formie CAWI (wspomaganego komputerowo wywiadu przez stronę WWW) w terminie 24–31 maja 2023 roku, za pośred-

nictwem platformy Google Forms. Kwestionariusz składał się z 9 stron – 43 pytań, w tym 3 pytań filtrujących oraz 5 pytań metrykalnych. Link do badania wraz z zaproszeniem do uczestnictwa i krótkim opisem został opublikowany na grupach na Facebooku zrzeszających studentów polskich uczelni. Zebrano 99 odpowiedzi, w tym 87 pełnych i zakwalifikowanych do dalszej analizy.

4. WYNIKI BADANIA I ICH INTERPRETACJA

4.1. POSTRZEGANIE TECHNOLOGII DEEPFAKE

Postrzeżenie technologii DF zostało zbadane za pomocą czterech pytań kwestionariusza – dwóch umieszczonych na początku oraz dwóch na końcu badania. Trzeba zaznaczyć, że na odpowiedzi na pytania umieszczone na końcu scenariusza mogło wpłynąć całe badanie, w trakcie którego respondenci zostali zaznajomieni z konkretnymi materiałami DF oraz jedną hipotetyczną sytuacją użycia DF. Badani mogli odpowiadać na te dwa końcowe pytania przez pryzmat tych konkretnych przykładów, a nie DF ogółem.

Pośród badanych 58,6% zadeklarowało, że spotkało się wcześniej z DF; 17,2% nie spotkało się wcześniej z DF, a 24,1% nie miało co do tego pewności. Badani zostali również zapytani w pytaniu otwartym o to, jak rozumieją termin „deepfake”. Wśród odpowiedzi znalazły się definicje terminu oraz skojarzenia z nim związane. Zostały one podzielone na dziesięć kategorii skupiających się na różnych aspektach DF i jego definicji (tab. 2). Przedstawione wyniki można podsumować następująco: 45,6%² respondentów postrzega DF jako technologię, a dokładniej jako proces manipulowania obrazem, wideo i/lub audio. 29,1% odpowiedzi traktowało DF jako gotowy, sfałszowany materiał lub wynik. W tym wypadku podział na DF stworzone za pomocą technologii bądź nie jest niezwykle istotny – materiały DF powstają z wykorzystaniem uczenia maszynowego i algorytmów, co odróżnia je od tzw. dumb fake’ów, które zakładają stworzenie fałszywego materiału za pomocą prostych technik montażowych [1].

Kolejna proponowana definicja DF jest bardzo ciekawa – DF jako podszywanie się pod kogoś za pomocą technologii (3,79% odpowiedzi). Istotą tej definicji jest wykorzystanie czyjegoś wizerunku, na co wskazało ponad 43% respondentów, ale nie w kontekście stworzenia jakiegokolwiek materiału (np. humorystycznego, dezinformacyjnego), a konkretnie kradzieży tożsamości. Wskazuje to na bezpośrednie skojarzenie DF z czymś złym, przestępstwem.

Ostatnia definicja, którą podało 14 respondentów (17,72%), również ma negatywne zabarwienie – fałszywa informacja, oszustwo. Odpowiedzi te mogły się wiązać z bezpośrednim przetłumaczeniem terminu „deepfake” na język polski, a tym samym mogą wynikać z braku znajomości tego terminu i niespotkania się wcześniej z DF (deklarowane przez 17,2% badanych).

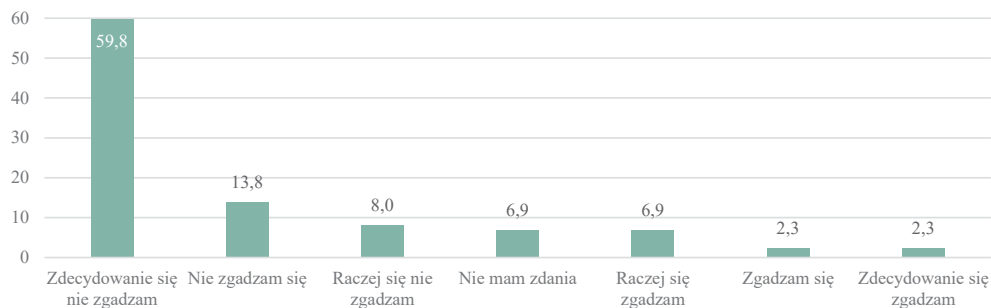
² Wartości procentowe w kontekście tego pytania obliczane są w stosunku do uzyskanych odpowiedzi, nie respondentów ogółem.

Tabela 2. Uogólnione definicje terminu „deepfake” na podstawie uzyskanych odpowiedzi oraz liczba respondentów odpowiadających w dany sposób

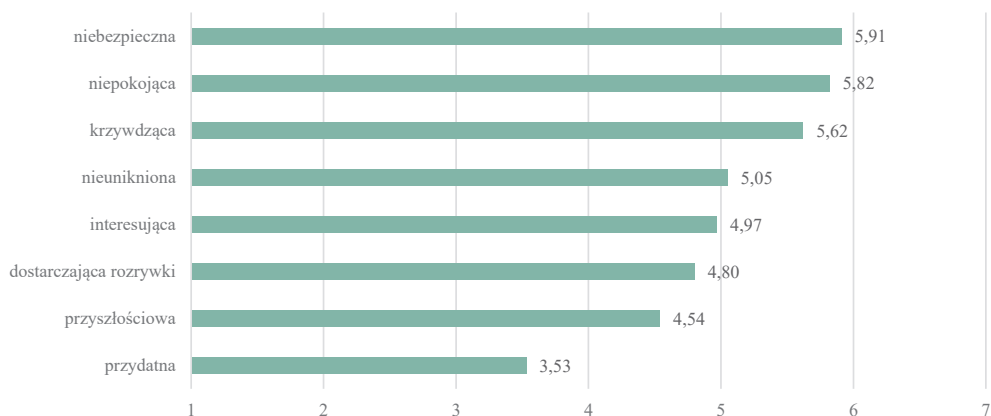
Definicja terminu „deepfake”	Liczba odpowiedzi	Procentowy wynik względem uzyskanych odpowiedzi na pytanie [%]
Technologia manipulowania obrazem, obróbka obrazu	9	11,39
Technologia manipulowania obrazem zawierającym czyjś wizerunek	9	11,39
Technologia manipulowania obrazem, wideo lub audio	9	11,39
Technologia manipulowania obrazem, wideo lub audio wykorzystującymi czyjś wizerunek i/lub głos	9	11,39
Sfałszowany materiał	4	5,06
Sfałszowany materiał przedstawiający czyjś wizerunek	7	8,86
Fałszywy materiał stworzony za pomocą technologii	3	3,79
Fałszywy materiał stworzony za pomocą technologii, przedstawiający czyjś wizerunek	9	11,39
Podszywanie się pod kogoś za pomocą technologii	3	3,79
Fałszywa informacja, oszustwo	14	17,72
Niesklasyfikowane dane	3	3,79

W pytaniu o skłonność do wykorzystania swojego wizerunku do stworzenia materiału DF (rys. 1) 59,8% respondentów zaznaczyło skrajną na podanej 7-punktowej skali odpowiedź „zdecydowanie się nie zgadzam”. Mimo tego, że w pytaniu nie zostało bezpośrednio określone, jaki to będzie charakter DF oraz jaka będzie jego treść, respondenci wyraźnie niechętnie myślą o DF ze swoim udziałem. Pokazuje to pośredni negatywny stosunek do korzystania z technologii DF.

Ten negatywny stosunek potwierdza się także w odpowiedziach na kolejne pytanie, gdzie zapytano o to, w jakim stopniu podane określenia DF zgadzają się z ich własnymi przekonaniami (rys. 2). Badani studenci, mimo tego, że uważają technologię DF za dostarczającą rozrywki oraz przyszłościową, to jednocześnie nie widzą przydatnych jej zastosowań. Uzyskany rozkład pokrywa się z widoczną tendencją w rozważaniach na temat zastosowań technologii DF – autorzy zdecydowanie częściej są w stanie wskazać zagrożenia związane z takimi materiałami niż realne korzyści lub skupiają się tylko na ich negatywnych skutkach [6, 7].



Rys. 1. Rozkład procentowy odpowiedzi na pytanie:
 „Jak bardzo zgadzasz się ze stwierdzeniem: »Był(a)bym skłonny(-a)
 do wykorzystania swojego wizerunku do stworzenia materiału deepfake«”?



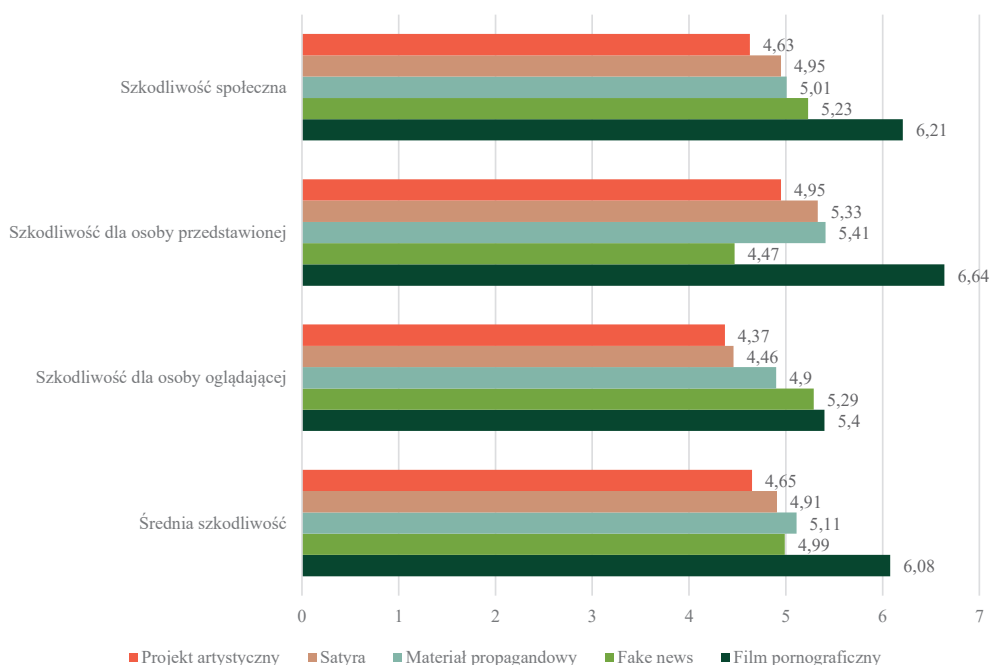
Rys. 2. Wartości średnie dla odpowiedzi na pytanie:
 „Uważam, że technologia deepfake jest...”. Zastosowano skalę od 1 do 7,
 gdzie 1 – „Zdecydowanie się nie zgadzam”, 7 – „Zdecydowanie się zgadzam”

Jeśli chodzi o przedstawiane materiały DF, 91,6% badanych zadeklarowało, że nie spotkało się wcześniej z żadnym z prezentowanych DF, być może dlatego, że są one związane z wydarzeniami w Ameryce, prawdopodobnie nie dotyczą ankietowanych bezpośrednio, a sami badani nie są zakładanym odbiorcą docelowym. W związku z niskim procentem osób deklaruujących wcześniejsze zetknięcie się z podanym materiałem DF można uznać, że uzyskane odpowiedzi dotyczące tych materiałów (a tym samym badane opinie) w większości nie są ugruntowane i opierają się na bezpośrednim, pierwszym doświadczeniu.

Respondenci zostali poproszeni o ocenę szkodliwości każdej z kategorii materiałów DF w trzech wymiarach: szkodliwości społecznej, szkodliwości dla osoby przedstawionej oraz szkodliwości dla osoby oglądającej taki typ materiału. Na pytania badani mogli odpowiedzieć w skali od 1 do 7, gdzie 1 oznacza „Zdecydowanie szkodliwy”, a 7 – „Zupełnie nieszkodliwy”.

Porównując średnie wartości odpowiedzi, niezależnie od rozważanej sfery, można zauważyć, że respondenci postrzegali jako najbardziej szkodliwe pornograficzne materiały DF. Jeśli chodzi o szkodliwość dla bezpośredniego odbiorcy, DF pornograficzne mają jednak tylko niewielką przewagę nad fake newsami. Co ciekawe, mimo że sfalszowane filmy pornograficzne nie mają aż tak bezpośrednich skutków dla społeczeństwa w porównaniu np. z treściami dezinformującymi [6], to w przedstawianym badaniu współczynnik postrzeganej szkodliwości społecznej DF pornograficznego jest największy, i to prawie o jeden stopień większy niż w przypadku kolejnej kategorii DF. Warto jednak jeszcze raz zaznaczyć, że na wyniki mogą mieć wpływ dobrane treści – respondenci mogli oceniać konkretnie przedstawiony materiał oprócz przypadku filmu pornograficznego, gdzie postawieni zostali przed sytuacją hipotetyczną, a więc oceniali wyobrażoną przez siebie sytuację.

Jak pokazano na rysunku 3, w opinii studentów najbardziej alarmujący jest DF pornograficzny (ze średnią szkodliwością 6,08). Kolejny pod względem średniej postrzeganej szkodliwości jest materiał propagandowy (5,11), chociaż średnio szkodliwy dla osoby go oglądającej. Dalej fake news (4,99), który studenci uznają za relatywnie mało szkodliwy dla osoby przedstawionej, oraz satyra (4,91). Badani studenci za najmniej szkodliwy materiał uznają projekt artystyczny, ze średnią 4,65 – mniejszą o prawie 1,5 punktu od materiału pornograficznego.



Rys. 3. Średnie odpowiedzi na pytania dotyczące szkodliwości społecznej deepfake'ów, szkodliwości dla osoby przedstawionej oraz jej oglądającej względem każdej kategorii. W pytaniach zastosowano skalę od 1 – „Zdecydowanie szkodliwy”, do 7 – „Zupełnie nieszkodliwy”. Na podstawie średnich wyników szkodliwości na każdej z płaszczyzn porównana została również średnia szkodliwość każdej kategorii

Ciekawy jest również rozkład średniej szkodliwości jakiegokolwiek materiału DF dla każdej z płaszczyzn. Średnia szkodliwość społeczna wynosi 5,21, dla osoby przedstawionej jest to 5,36, a dla osoby oglądającej – 4,88. Na podstawie tych wyników można stwierdzić, że DF najbardziej szkodliwe są nie dla społeczeństwa, a dla osoby, której wizerunek jest wykorzystany. Według badanych DF mają najmniej szkodliwy wpływ na osoby je oglądające. Takie podejście (największa szkodliwość dla osoby, która jest przedstawiona) widać w charakterze już istniejących praw regulujących DF, które zakładają głównie ochronę osób, których wizerunek został wykorzystany w materiale pornograficznym, oraz osób kandydujących na stanowiska państwowe [5] (drugi rodzaj ochrony zakłada głównie ochronę demokracji oraz spokoju publicznego, ale również wizerunku). Raport, który przygotowali Huijstee i inni [5], wskazuje jednak, że najniebezpieczniejszym ze skutków DF jest ich wpływ na zaufanie społeczeństwa wobec materiałów audiowizualnych w mediach, co w kontekście tego badania wskazywałoby na większą szkodliwość dla społeczeństwa i osoby oglądającej.

Wysoka szkodliwość wobec osób, których wizerunek został przedstawiony, może mieć inne źródło – w badaniu respondentami były osoby prywatne, więc w tych wynikach potencjalnie przejawia się odczuwane przez nich zagrożenie ze strony DF. Podstawą do takiego wniosku może być również odpowiedź na wcześniej omawiane pytanie dotyczące wykorzystania swojego wizerunku do stworzenia DF, gdzie prawie 60% respondentów zdecydowanie by tego nie zrobiło. Pytanie zostało zadane na końcu badania, co znaczy, że na pewno nie ma wpływu na wcześniejsze odpowiedzi dotyczące szkodliwości, dlatego takie powiązanie może być w ogóle rozważane, chociaż nie ma na nie bezpośrednich dowodów.

4.2. OZNACZANIE FAŁSZYWOŚCI MATERIAŁU DEEPFAKE

Prezentacji każdego materiału DF towarzyszyły pytania nie tylko o postrzeganą szkodliwość, ale także o to, czy dany materiał powinien być według badanych oznaczony jako fałszywy. Najmniej kontrowersyjne rodzaje materiału DF to materiały pornograficzne (90,08% odpowiedzi za oznaczaniem ich fałszywości) oraz fake newsy (88,5% za oznaczaniem). Kolejne kategorie DF otrzymujące większość głosów za oznaczeniem fałszywości to projekty artystyczne (83,9% za oznaczaniem) oraz materiały propagandowe (82,76% za oznaczaniem), a na samym końcu, choć z niewiele niższym wynikiem – DF o treściach satyrycznych (79,31% za oznaczaniem).

Oprócz zdecydowanych „za” lub „przeciw” oznaczaniu fałszywości materiałów DF niektórzy respondenci wybierali odpowiedź „to zależy od danego materiału”. Najwięcej takich odpowiedzi uzyskał projekt artystyczny (12,64%) oraz materiał propagandowy (10,34%), a najmniej fake news (4,6%). Pokazuje to nieznaczną zależność między treścią materiału a koniecznością oznaczania go.

Rozkład odpowiedzi na pytania zadane bezpośrednio pod materiałami DF częściowo pokrywa się z rozkładem odpowiedzi uzyskanych w pytaniu umieszczonym pod koniec kwestionariusza. Widoczne jest jednak rozróżnienie w kwestii wykorzystania wizerunku między wizerunkiem osoby publicznej i osoby prywatnej. Najwięcej respondentów (86,2%) zaznaczyło, że konieczne jest oznaczenie fałszywości materiału przedstawiającego osobę prywatną, wypowiadającą się lub działającą w sposób sprzeczny z jej prawdziwymi poglądami, gdzie taki

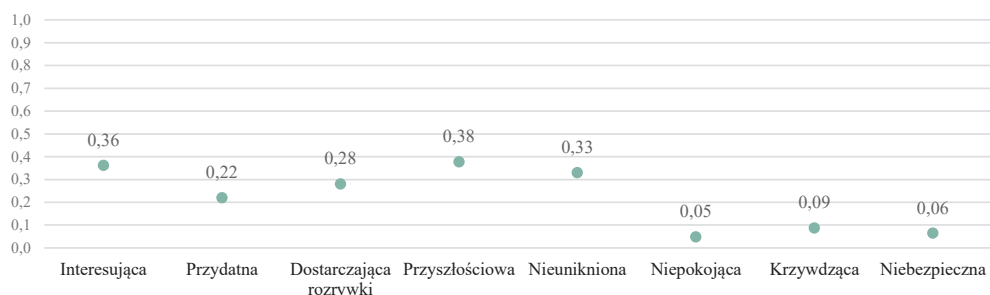
sam materiał, ale przedstawiający osobę publiczną, za obowiązkowy do oznaczenia uznaje 82,76% badanych. Inaczej w przypadku filmów pornograficznych – 85,05% określa te materiały jako obowiązkowe do oznaczenia w przypadku wykorzystania wizerunku osoby publicznej, gdzie taki obowiązek przy wykorzystywaniu wizerunku osoby prywatnej deklaruje około 3,5% respondentów mniej. 3 respondentów (3,45%) zaznaczyło zaś, że nie ma potrzeby, aby którykolwiek z podanych materiałów był oznaczany.

Ciekawe głosy znalazły się w polu otwartej odpowiedzi, w przypadku zaznaczenia opcji „Inne”. Niektóre podkreślały znaczenie praw autorskich i treści wykorzystywanych do stworzenia DF, zaś jeden respondent konkretnie zaznaczył, jak powinno to oznaczenie wyglądać. Pomysł zakłada stworzenie znaku wodnego, który będzie pojawiał się na jakimkolwiek publikowanym materiale i to administracja platformy dystrybuującej dany materiał będzie określać jego ostateczną szkodliwość na podstawie zgłoszeń użytkowników. Brak oznaczenia wiązać ma się z odpowiedzialnością prawną. Trudno jednak wyegzekwować takie regulacje, jeśli autor jest nieznany lub anonimowy, a jest to częste w przypadku materiałów DF [5].

4.3. RELACJA Z TECHNOLOGIA A OPINIA DOTYCZĄCA TECHNOLOGII DEEPPAKE

W następnej kolejności sprawdzono, czy znajomość technologii mierzona według skali ATI-S [19] jest powiązana z opiniami dotyczącymi technologii DF. W pierwszej części omówione zostaną zależności między skalą ATI-S a opiniami na temat DF, zaś w drugiej to, czy skala ATI-S przewiduje postrzeganą szkodliwość różnych rodzajów DF (i jeśli tak, to w jakim stopniu ją przewiduje).

W celu zbadania zależności między skalą ATI-S a opiniami na temat DF sprawdzone zostały współczynniki korelacji liniowej między tymi dwoma zmiennymi. Rysunek 4 przedstawia wyniki tej analizy, zgodnie z którymi żadna z opinii na temat DF wyrażona w przymiotnikach opisujących ich możliwy charakter nie wykazuje bardzo silnej zależności liniowej ze skalą ATI-S (wszystkie współczynniki mają korelacje poniżej wartości 0,4). Wszystkie uzyskane korelacje są jednak pozytywne, wskazują na to, że im wyższa średnia skali ATI-S, tym wyższy wynik wyrażający wyższy stopień zgody z danym określeniem technologii DF.



Rys. 4. Porównanie współczynników korelacji liniowej między wynikami skali ATI-S a opiniami na temat wyszczególnionych w badaniu określeń dotyczących technologii deepfake

Najsilniejsze zależności występują między skalą ATI-S a opiniami na temat tego, czy technologia DF jest przyszłościowa (korelacja 0,38) i interesująca (korelacja 0,36). Podobnie im wyższa ogólna znajomość technologii wśród respondentów, tym mocniejsze ich przekonanie, że technologia DF jest nieunikniona (korelacja 0,33) i dostarczająca rozrywki (korelacja 0,28). Można także zauważyć, że znajomość technologii jest bardzo słabo skorelowana (prawie zupełnie nieskorelowana) z opiniami na temat tego, czy technologia DF jest niepokojąca, krzywdząca i niebezpieczna (korelacje poniżej 0,1). Wyniki te sugerują, że opinie w tych trzech kwestiach prawdopodobnie nie zależą o tego, czy ktoś lubi i umie sprawnie posługiwać się szeroko rozumianymi technologiami.

Druga część analizy skupia się na przewidywaniu postrzeganej szkodliwości DF dla różnych ich kategorii. W tym celu dla każdej kategorii DF wykorzystana została „średnia szkodliwość” – średnia wyniku postrzeganej szkodliwości społecznej dla osoby przedstawianej i oglądającej. Wartości te zostaną wykorzystane jako zmienne niezależne w serii regresji liniowych o takiej samej konstrukcji (z taką samą listą zmiennych niezależnych).

Każdy ze zbudowanych modeli regresji liniowej zawiera następujące zmienne zależne:

- średnia skali ATI-S, która określa relację respondenta z technologią, tzn. jej szeroko rozumianą znajomość (skala 1–7);
- zmienne demograficzne: wiek (wyrażony w latach), płeć (zmienna dychotomiczna, gdzie 1 – mężczyzna) i poziom studiów (zmienna dychotomiczna, gdzie 1 – studiowanie na studiach II stopnia lub podyplomowych);
- studiowanie kierunku społecznego (zmienna dychotomiczna) – studenci kierunku społecznego mogą mieć wyższe kompetencje w zakresie dostrzegania szkodliwości technologii DF zarówno dla społeczeństwa, jak i jednostki.

Wbrew oczekiwaniom żaden ze zbudowanych w ten sposób na potrzeby analizy modeli regresji liniowej nie dał wyników statystycznie istotnych (wartości F powyżej 0,05). Ze względu na słabą rozpiętość wiekową wśród respondentów (odchylenie standardowe o wartości 2,83, gdzie miarą jest wiek mierzony w latach) i osiągane wysokie wartości p w modelach dla zmiennej „wiek” zbudowana została jeszcze raz ta sama seria modeli regresji liniowych bez tej zmiennej. Wszystkie modele mają po 87 obserwacji. Tym razem otrzymano jeden model, którego wyniki są statystycznie istotne: ze zmienną zależną postrzeganej szkodliwości materiału pornograficznego ($F = 0,038$). Pozostałe modele nie są statystycznie istotne, nawet jeśli lista zmiennych niezależnych została zredukowana do jednej – średniej skali ATI-S. Oznacza to, że postrzeganie szkodliwości DF w czterech kategoriach (materiału artystycznego, satyry, materiału propagandowego i fake newsa) nie jest zależne od indywidualnej relacji z technologią.

Tabela 3 zawiera wyniki dla modelu dotyczącego materiału pornograficznego. Pokazuje ona, że dwie zmienne zależne – skala ATI-S oraz płeć – mają znaczenie dla przewidywania postrzeganej szkodliwości materiału pornograficznego DF (dla wartości p na poziomie niższym niż 0,05). Im niższy średni wynik w skali ATI-S, tym wyższa postrzegana szkodliwość materiału pornograficznego. Im bardziej ktoś jest obeznany z technologią w ogóle, tym mniejsza w jego oczach szkodliwość pornograficznych materiałów DF. Dodatkowo, co ciekawe, deklarowanie płci męskiej zwiększa prawdopodobieństwo wyższej postrzeganej szkodliwości

takiego materiału. Trzeba jednak zaznaczyć, że współczynnik determinacji R^2 naszego modelu wynosi tu jedynie 0,12, co oznacza, że zmienność w postrzeganej szkodliwości materiału pornograficznego wyjaśnionej przez model jest dość niska. W przyszłych badaniach warto więc poszukać innych wytłumaczeń, które mogłyby okazać się ważniejsze dla zrozumienia czynników wpływających na opinie i postrzeganą szkodliwość różnego rodzaju materiałów DF wśród studentów, ale także wśród osób w różnych kategoriach wiekowych oraz o różnym poziomie wykształcenia.

Tabela 3. Przewidywanie postrzeganej szkodliwości pornograficznego materiału deepfake – analiza regresji liniowej

	<i>B</i>	<i>SE</i>	<i>t</i>	Wartość <i>p</i>
(Stała)	2,609	0,460	5,671	0,000
Średnia ATI-S	−0,182	0,086	−2,119	0,037
Mężczyzna	0,663	0,249	2,666	0,009
Studia II stopnia lub podyplomowe	−0,133	0,237	−0,560	0,577
Kierunek społeczny	−0,089	0,243	−0,366	0,715
$F = 0,038$				
$R^2 = 0,12$				

5. PODSUMOWANIE I WNIOSKI

Przedstawione badanie pokazało, że studenci rozumieją DF na kilka sposobów: jako technologię (czyli proces tworzenia), materiał (czyli gotowy wynik), ogólnie pojętą fałszywą informację i próbę podszywania się pod kogoś. Stosunek do DF jest raczej negatywny, studenci uważają je za bardziej niebezpieczne i niepokojące niż przydatne i przyszłościowe. Jeśli chodzi o szkodliwość przyjętych kategorii DF (projekt artystyczny, satyra, materiał propagandowy, fake news oraz materiał pornograficzny), za najbardziej szkodliwy uznawany jest sfalszowany materiał pornograficzny, a za najmniej szkodliwy – projekt artystyczny. Poglądy dotyczące konieczności oznaczania fałszywości DF w zależności od kategorii nieznacznie się różniły, choć ogólnie opowiadano się za koniecznością ich oznaczania. Postrzeganie DF nieznacznie zależy natomiast od obycia z technologią, chociaż osoby, które deklarują większe obycie z technologią, uważają ją za bardziej przyszłościową i interesującą, a materiały pornograficzne za mniej szkodliwe.

Przeprowadzone badanie jest dobrym punktem wyjścia do dalszych poszukiwań w tym zakresie. Zaleca się jednak dobór bardziej zróżnicowanej próby badawczej nie tylko pod względem respondentów (różne grupy wiekowe), ale również treści do badania. W przypadku większego zainteresowania kwestią rozpoznawania fałszywości DF przez ich odbiorców warto przygotować próbę kontrolną zawierającą prawdziwe materiały, co stosowano już

w badaniach o takiej tematyce. W kwestii problematyki opinii warto rozbudować kategorie analityczne tak, by były bardziej szczegółowe i uwzględniały materiały o pozytywnym zabarwieniu, co sprawi, że wyniki będą bardziej zróżnicowane. Warto również wybrać więcej niż jeden materiał reprezentujący kategorię, by porównać, czy postrzegana szkodliwość nie zależy od treści przedstawionego materiału.

Niezależnie jednak od rodzaju planowanego badania i poruszanych kwestii każde z nich jest istotne dla rozwoju tej dziedziny badań. Temat DF jest stosunkowo nowy, ale technologia ta staje się coraz bardziej zaawansowana. Przeprowadzenie badania, a później publikacja wyników same w sobie będą zwracać uwagę na złożoność problematyki DF, tym samym otwierając dyskusję na temat regulacji prawnych, których ciągle jest niewiele, a które mogą być ważnym krokiem w kierunku ochrony potencjalnych ofiar technologii DF.

LITERATURA

- [1] Giles K., Hartmann K., Mustaffa M., *The Role of Deepfakes in Malign Influence Campaigns*, NATO Strategic Communications Centre of Excellence, 2019.
- [2] Gamage D., Ghiasi P., Bonagiri V.K., Whiting M.E., Sasahara K. (2022). *Are deep-fakes concerning? Analyzing conversations of deepfakes on Reddit and exploring societal implications*, [w:] Barbosa S., Lampe C., Appert C., Shamma D.A., Drucker S., Williamson J., Yatani K. (eds.), *CHI '22: Proceedings of the 2022. CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, <https://doi.org/10.1145/3491102.3517446>.
- [3] Shamook, *The Mandalorian Luke Skywalker deepfake*, YouTube, 2020, <https://www.youtube.com/watch?v=wrHXA2cSpNU> [dostęp: 30.06.2023].
- [4] Boháček M., Farid H., *Protecting president Zelenskyy against deep fakes*, Arxiv, 2022, <https://doi.org/10.48550/arXiv.2206.12043>.
- [5] Huijstee M., van, Boheemen P., van, Das D., Nierling L., Jahnel J., Karaboga M., Fatun M., Kool L., Gerristen J., *Tackling deepfakes in European policy* (PE 690.039), European Parliamentary Research Service, 2021, [https://www.europarl.europa.eu/thinktank/en/document/EPRS_STU\(2021\)690039](https://www.europarl.europa.eu/thinktank/en/document/EPRS_STU(2021)690039).
- [6] Chesney R., Citron D.K., *Deep fakes: a looming challenge for privacy, democracy, and national security*, California Law Review, vol. 107, 2018, s. 1753–1820, <http://doi.org/10.2139/ssrn.3213954>.
- [7] Harris D., *Deepfakes: false pornography is here and the law cannot protect you*, Duke Law & Technology Review, vol. 17, 2019, s. 99–127.
- [8] Dobber T., Metoui N., Trilling D., Helberger N., Vreese C., de, *Do (microtargeted) deep-fakes have real effects on political attitudes?*, The International Journal of Press/Politics, vol. 26, iss. 1, 2021, s. 69–91, <https://doi.org/10.1177/1940161220944364>.
- [9] Vaccari C., Chadwick A., *Deepfakes and disinformation: Exploring the impact of synthetic political video on deception, uncertainty, and trust in news*, Social Media + Society, vol. 6, iss. 1, 2020, s. 1–13, <https://doi.org/10.1177/2056305120903408>.
- [10] Sundar S.S., Molina M.D., Cho E. (2021). *Seeing is believing: is video modality more powerful in spreading fake news via online messaging apps?*, Journal of Computer-Mediated Communication, vol. 26, iss. 6, s. 301–319, <https://doi.org/10.1093/jcmc/zmab010>.

- [11] Arnold M., Schmucker M., Wolthusen S.D., *Techniques and applications of digital watermarking and content protection*, Artech House, Boston 2003.
- [12] Feliksiak M., *Korzystanie z internetu w 2022 roku*, Komunikat z badań, nr 77/2022, CBOS, Warszawa 2022.
- [13] Karnouskos S., *Artificial intelligence in digital media: the era of deepfakes*, IEEE Transactions on Technology and Society, vol. 1, iss. 3, 2020, s. 138–147, <https://doi.org/10.1109/TTS.2020.3001312>.
- [14] Ayyub R., *I was the victim of deepfake porn plot intended to silence me*, Huffpost, 2021, https://www.huffingtonpost.co.uk/entry/deepfakeporn_uk_5bf2c126e4b0f32bd-58ba316 [dostęp: 30.06.2023].
- [15] Deeptomcruise, *Sports!*, TikTok, 2021, <https://www.tiktok.com/@deeptomcruise/video/6932166297996233989> [dostęp: 30.06.2023].
- [16] Marshall Artist, *President Joe Biden's magical pistachio story (deepfake AI)*, YouTube, 2023, <https://www.youtube.com/watch?v=yVEhrIMc-ps> [dostęp: 30.06.2023].
- [17] Posters B. [@bill_posters_uk], *'Imagine this...' (2019)*, Instagram, 2019, <https://www.instagram.com/p/ByaVigGFP2U/> [dostęp: 30.06.2023].
- [18] Satariano A., Mozur P., *The people onscreen are fake. The disinformation is real*, The New York Times, 2023, <https://www.nytimes.com/2023/02/07/technology/artificial-intelligence-training-deepfake.html> [dostęp: 30.06.2023].
- [19] Wessel D., Attig Ch., Franke T. (2019). *ATI-S – an ultra-short scale for assessing affinity for technology interaction in user studies*, [w:] Alt F., Bulling A., Döring T. (Hrsg.), *Mensch und Computer 2019 – TAGUNGSBAND*, 2019, s. 147–154, <https://doi.org/10.1145/3340764.3340766>.

Olga Sieradzan*

GDZIE NAJLEPIEJ ZOSTAĆ RODZICEM? RANKING PAŃSTW SPRZYJAJĄCYCH RODZICIELSTWU

Często poruszanym w ostatnim czasie w Polsce tematem jest problem niskiego przyrostu naturalnego. Zmiany postaw i priorytetów życiowych młodych osób przyczyniły się do przesunięcia wieku zakładania rodziny. Co więcej, podejmowane przez rząd działania mające na celu zwiększenie przyrostu naturalnego nie rozwiązują tego problemu. Wiele osób zastanawia się, czy chce zostać w przyszłości rodzicem. Dodatkowym dylematem jest również decyzja o miejscu zamieszkania. Młodzi ludzie nierzadko rozważają wyjazd za granicę.

Celem przeprowadzonego badania jest stworzenie rankingu wybranych państw świata, w których najlepiej zostać rodzicem. Podejmowana jest również próba odpowiedzi na pytanie o to, co należy poprawić w Polsce, aby zwalczyć malejący przyrost naturalny.

Badanie zostało przeprowadzone na podstawie danych z lat 2019–2023 dotyczących różnych czynników związanych z byciem rodzicem. Szczególną uwagę zwrócono na dane dotyczące równości praw przysługujących ojcu i matce oraz równości płac kobiet i mężczyzn. Ponadto uwzględniono również dane na temat opieki zdrowotnej, sytuacji szkolnictwa oraz sytuacji środowiskowej danego kraju. Do stworzenia rankingu państw wykorzystano metodę Hellwiga.

WHERE IS THE BEST PLACE TO BECOME A PARENT? A RANKING OF COUNTRIES FAVORABLE TO PARENTHOOD

A frequently discussed topic in Polska lately is the issue of low natural population growth. Changes in attitudes and life priorities among young people have contributed to a delay in starting families. Furthermore, government actions aimed at increasing natural population growth have not addressed this problem. Many individuals are contemplating whether they want to become parents in the future. Another dilemma is the decision about where to reside, with many young people considering moving abroad.

The objective of the conducted study is to create a ranking of selected countries worldwide where it is best to become a parent. An attempt is also made to answer the question of what needs to be improved in Polska to combat declining natural population growth.

The study was based on data from 2019–2023 concerning various factors related to parenthood. Special attention was paid to data concerning equal rights for fathers and mothers, as well as gender pay equality. Additionally, data on healthcare, educational system, and environmental conditions of each country were considered. The Hellwig method was utilized to create the ranking of countries.

* AGH Akademia Górniczo-Hutnicza, Wydział Zarządzania, Koło Naukowe Ekonometriki.

1. WPROWADZENIE

Na wiek, w którym ludzie decydują się założyć rodzinę, ma wpływ wiele czynników. Można do nich zaliczyć przede wszystkim czynniki kulturowe i społeczne, które różnią się w poszczególnych krajach. We Francji posiadanie liczego potomstwa jest bardzo dobrze postrzegane przez społeczeństwo, ale kobieta zwykle rodzi tam pierwsze dziecko pomiędzy 30 a 31 rokiem życia. Rząd tego kraju prowadzi politykę rodzinną, w której bardzo ważna jest opieka instytucjonalna nad dziećmi. Kraj ten wyróżnia się również rozbudowanym systemem socjalnym. Wszystko to przekłada się na wysoki przyrost naturalny we Francji [1]. W niektórych państwach zachęca się jednak do zakładania rodziny w bardzo wczesnym wieku. Zgodnie z informacjami dostępnymi na stronie *World Population Review* [2] w Bangladeszu, Azerbejdżanie czy Nepalu przeciętnie kobieta rodzi swoje pierwsze dziecko między 25 a 26 rokiem życia, natomiast w krajach z dynamicznie rozwijającą się gospodarką i bardziej postępowym społeczeństwem średni wiek, w którym kobieta rodzi pierwsze dziecko, jest coraz wyższy. Dane zebrane przez United Nations Economic Commission for Europe [3] wykazują, że w Norwegii średni wiek posiadania pierwszego dziecka przez kobietę na przestrzeni lat 2012–2021 wzrósł z 28,4 do 30 lat, w Dani z 29,3 do 30,3, a w Polsce z 26,6 do 28,1.

Polska od 2013 roku zmaga się z ujemnym przyrostem naturalnym, który pogłębił się podczas pandemii COVID-19 [4]. Oznacza to, że liczba narodzin w kraju jest mniejsza niż liczba zgonów, co w rezultacie powoduje, że społeczeństwo się starzeje. Taka sytuacja stwarza wiele wyzwań dla rządzących. Po pierwsze na opiekę nad osobami starszymi potrzebne są niemałe środki finansowe. Nakłady te w głównej mierze pochodzą z budżetu państwa, a ten zależy od kondycji gospodarki i podatków opłacanych przez osoby w wieku produkcyjnym. Malejąca liczba osób w tej grupie wiekowej sprawia, że aktualny system emerytalny nie działa skutecznie, ponieważ składki ZUS pracujących osób są przeznaczane na świadczenia obecnych emerytów. Dodatkowo rośnie ryzyko, że osoby starsze zostaną bez opieki. W celu przeciwdziałania temu trendowi rząd stara się zachęcić społeczeństwo do tego, aby nie rezygnować z potomstwa na rzecz kariery. Aktualnie prowadzonych jest kilka programów rządowych wspierających posiadanie dzieci w Polsce. Zaliczyć można do nich na przykład program „Rodzina 800 plus”, czyli nieopodatkowane 800 zł miesięcznie na każde dziecko do 18. roku życia, lub program „Asystent rodziny”, czyli wsparcie finansowe dla gmin, które zatrudniają specjalistów pomagających rodzinom w trudnej sytuacji. Wszelkie próby zwiększenia dzietności w kraju na razie nie przynoszą jednak oczekiwanych efektów.

W niniejszym badaniu podjęto próbę odpowiedzi na pytanie, co należy zmienić w Polsce, aby zwalczyć malejący przyrost naturalny. W tym celu utworzono ranking krajów sprzyjających rodzicielstwu uwzględniający różne czynniki oraz przeanalizowano pozycję Polski w tym zestawieniu.

2. ANALIZA LITERATURY

W roku 2020 opublikowany został raport *Worlds of influence: Understanding what shapes child well-being in rich countries* przygotowany przez United Nations Children's Fund (UNICEF) [5]. Podjęto w nim próbę identyfikacji czynników wpływających na lepsze

dzieciństwo. Przeanalizowano wiele obszarów powiązanych z rodzicielstwem, np. liczbę godzin pracy rodzica w tygodniu, realizację idei życia w równowadze (*work-life balance*) czy relacje rodziców ze szkołami, do których uczęszczają ich dzieci. Niemniej jednak autorzy skoncentrowali się głównie na obszarach bezpośrednio dotyczących dzieci, takich jak zdrowie fizyczne, dobre samopoczucie psychiczne oraz umiejętności (naukowe i społeczne) dziecka. Uwzględniając te czynniki, utworzono rankingi krajów. Wyniki badania przedstawiono w tabeli 1.

Tabela 1. Ranking krajów sprzyjających dobrobytowi dzieci

Ranking ogółem	Państwo	Dobrostan psychiczny (<i>mental well-being</i>)	Zdrowie fizyczne (<i>physical health</i>)	Umiejętności (<i>skills</i>)
1	Holandia	1	9	3
2	Dania	5	4	7
3	Norwegia	11	8	1
4	Szwajcaria	13	3	12
5	Finlandia	12	6	9
6	Hiszpania	3	23	4
7	Francja	7	18	5
8	Belgia	17	7	8
9	Słowenia	23	11	2
10	Szwecja	22	5	14
11	Chorwacja	10	25	10
12	Irlandia	26	17	6
13	Luksemburg	19	2	28
14	Niemcy	16	10	21
15	Węgry	15	21	13
16	Austria	21	12	17
17	Portugalia	6	26	20
18	Cypr	2	29	24
19	Włochy	9	31	15
20	Japonia	37	1	27
21	Korea Południowa	34	13	11
22	Czechy	24	14	22
23	Estonia	33	15	16
24	Islandia	20	16	34

Tabela 1 cd.

Ranking ogółem	Państwo	Dobrostan psychiczny (<i>mental well-being</i>)	Zdrowie fizyczne (<i>physical health</i>)	Umiejętności (<i>skills</i>)
25	Rumunia	4	34	30
26	Słowacja	14	27	36
27	Wielka Brytania	29	19	26
28	Łotwa	25	24	29
29	Grecja	8	35	31
30	Kanada	31	30	18
31	Polska	30	22	25
32	Australia	35	28	19
33	Litwa	36	20	33
34	Malta	28	32	35
35	Nowa Zelandia	38	33	23
36	USA	32	38	32
37	Bułgaria	18	37	37
38	Chile	27	36	38

Źródło: opracowanie własne na podstawie [5]

Polska w ogólnym rankingu uplasowała się na 31 miejscu. W tabeli 2 zawarto wyniki częściowe dotyczące Polski.

Tabela 2. Zestawienie wyników częściowych dotyczących Polski

Wskaźnik	Wynik
Odsetek dzieci w wieku 15 lat z wysoką satysfakcją z życia [%]	72
Liczba samobójstw na 100 000 osób w wieku 15–19 lat	8,8
Liczba śmierci na 1000 dzieci w wieku 5–14 lat	1,16
Odsetek młodych ludzi w wieku 5–19 lat, którzy mają nadwagę lub cierpią na otyłość [%]	26
Odsetek dzieci w wieku 15 lat z podstawową biegłością w czytaniu i matematyce [%]	72
Odsetek dzieci w wieku 15 lat, które łatwo znajdują przyjaciół [%]	70

Źródło: opracowanie własne na podstawie [5]

W obszarze „dobrostan psychiczny” (*mental well-being*) Polska wypadła najgorzej – to właśnie w nim uzyskała najniższe miejsce. Obszar ten obejmował odsetek dzieci w wieku 15 lat z wysoką satysfakcją z życia oraz liczbę samobójstw na 100 000 osób w wieku 15–19 lat. W Polsce 72% dzieci w wieku 15 lat charakteryzowało się wysoką satysfakcją z życia, a liczba samobójstw na 100 000 osób wśród młodych osób wynosiła 8,8. Dla porównania kraje z pierwszych 10 miejsc miały rezultaty powyżej 80% w przypadku odsetka dzieci z wysoką satysfakcją oraz dwukrotnie niższe wartości niż Polska w przypadku liczby samobójstw.

Z kolei w obszarze „zdrowie fizyczne” (*physical health*) uwzględniono liczbę śmierci na 1000 dzieci w wieku 5–14 lat oraz odsetek młodych ludzi w wieku 5–19 lat, którzy mają nadwagę lub cierpią na otyłość. Jeśli chodzi o pierwszy czynnik, Polska uzyskała wynik równy 1,16 i była to wartość większa o ok. 0,61 od średniej liczby zmarłych dzieci w pierwszych 10 krajach. W przypadku drugiego czynnika Polska wypadła znacznie lepiej, ponieważ uplasowała się na 12 miejscu z 26% dzieci otyłych lub mających nadwagę.

W ostatnim analizowanym obszarze – „umiejętności” (*skills*) – wzięto pod uwagę odsetek dzieci w wieku 15 lat z podstawowymi umiejętnościami w czytaniu i matematyce oraz odsetek dzieci w wieku 15 lat, które z łatwością nawiązują przyjaźnie. Jeżeli chodzi o pierwszą wytyczną, to Polska zajęła 7 miejsce z wysokim wynikiem 72%, różniącym się jedynie o 7% od wyniku kraju, który zajął pierwsze miejsce (Estonia). W przypadku drugiego czynnika wypadła jednak zdecydowanie słabiej i zajęła 4 miejsce od końca z wynikiem 70% dzieci, które łatwo nawiązują nowe znajomości. Warto tu jednak nadmienić, że zróżnicowanie wyników tej kategorii wśród wszystkich państw było niewielkie.

Na podstawie opublikowanego przez UNICEF raportu można wywnioskować, że w kontekście dobrobytu dzieci w Polsce istotne jest skoncentrowanie się na poprawie dobrostanu psychicznego najmłodszych. Polska wyraźnie odstaje pod tym względem od najlepiej ocenionych krajów w rankingu. Wyniki te nie odpowiadają jednak w pełni na postawione we wstępie pytanie o to, co należy zmienić w Polsce, aby zwalczyć malejący przyrost naturalny, ponieważ nie uwzględniają wielu ważnych czynników. W związku z tym w niniejszej pracy postanowiono utworzyć ranking krajów, biorąc pod uwagę większą liczbę czynników i koncentrując się na dobrobycie rodziców.

3. METODA HELLWIGA (1968)

Wielowymiarowa analiza porównawcza (WAP) to grupa metod statystycznych, które służą do jednoczesnej analizy co najmniej dwóch zmiennych opisujących każdy badany obiekt. Dzięki jej zastosowaniu można przeprowadzać kompleksowe badania dające możliwość szerokiego i obiektywnego spojrzenia na analizowane zjawiska. W Polsce po raz pierwszy próbę opisu zjawisk złożonych za pomocą cechy syntetycznej podjął Zdzisław Hellwig w 1968 roku.

Metoda Hellwiga [6–8], znana również jako metoda wzorca, jest techniką porządkowania liniowego umożliwiającą konstrukcję rankingów. Kluczowym etapem w badaniu jest identyfikacja zmiennych, które zostaną uwzględnione przy ustalaniu hierarchii obiektów. Zalecane

jest poparcie tego wyboru opiniami ekspertów. W przypadku przeprowadzonego badania zmienne zostały wybrane na podstawie niniejszych publikacji:

- *Worlds of influence: Understanding what shapes child well-being in rich countries* [5];
- *Measuring and monitoring the well-being of young children around the world* [9, s. 9–22];
- *European quality of life. Survey 2016* [10].

Dodatkowo przy kwalifikowaniu cech do zbioru cech diagnostycznych należy kierować się również:

- **kryterium merytorycznym** – przy wyborze zmiennych ważne jest uwzględnienie mierzalności cech, dostępności danych liczbowych, wiarygodności danych, interpretowalności oraz charakteru cech;
- **kryterium metodologicznym** – zmienne powinny charakteryzować się dużą zmiennością wśród badanych obiektów (w przeprowadzonym badaniu wszystkie zmienne o współczynniku zmienności niższym niż 0,1 zostały odrzucone) oraz nie powinny być ze sobą silnie skorelowane.

Kolejnym ważnym etapem jest określenie charakteru rozważanych zmiennych. Wyróżnić można:

- **stymulanty** – zmienne, dla których pożądane są wysokie wartości; im większy odczyt tej zmiennej, tym lepiej obiekt wypadnie w rankingu;
- **destymulanty** – zmienne, dla których pożądane są niskie wartości; im niższy odczyt tej zmiennej, tym lepiej obiekt wypadnie w rankingu;
- **nominanty** – zmienne, dla których istnieje jedna pożądana wartość; im bliższy odczyt do pożądanej wartości, tym lepiej obiekt wypadnie w rankingu.

Do przeprowadzenia badania należy zamienić wszystkie zmienne diagnostyczne zakwalifikowane jako nominanty na stymulanty. Może do tego posłużyć wzór (1):

$$z_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{dla } x_{ij} = N_j \\ \frac{1}{x_{ij} - N_j + 1} & \text{dla } x_{ij} > N_j \\ \frac{1}{x_{ij} - N_j - 1} & \text{dla } x_{ij} < N_j \end{cases} \quad (1)$$

gdzie N_j oznacza wartość nominalną dla j -tej zmiennej oraz x_{ij} oznacza wartość j -tej zmiennej dla i -tego obiektu. Ostatecznie w celu umożliwienia porównywania ich między sobą wszystkie zmienne należy zestandaryzować, do czego wykorzystano wzór (2):

$$z_{ij} = \frac{x_{ij} - \bar{x}_j}{s_j} \quad (2)$$

gdzie s_j to odchylenie standardowe j -tej zmiennej, a $\bar{x}_j$ to średnia arytmetyczna j -tej zmiennej.

Punktem wyjścia do zbudowania rankingu według metody Hellwiga jest skonstruowanie wzorca oraz antywzorca. Wzorzec przyjmuje maksymalny odczyt zmiennej wśród badanych obiektów, jeżeli zmienna jest stymulantą, oraz minimalny odczyt, jeśli zmienna jest destymulantą. Z kolei antywzorzec przyjmuje minimalny odczyt zmiennej wśród badanych obiektów, jeżeli zmienna jest stymulantą, oraz maksymalny, jeśli zmienna jest destymulantą. Wzorzec oraz antywzorzec stanowią punkty w p -wymiarowej przestrzeni, gdzie p to liczba zmiennych diagnostycznych branych pod uwagę w badaniu. Wykorzystywane są one do wyznaczenia miary d_0 będącej odległością pomiędzy obiektami: wzorcowym i antywzorcowym. Miara ta określona jest wzorem (3):

$$d_0 = \sqrt{\sum_{j=1}^p (z_{oj} - z_{-oj})^2} \quad (3)$$

gdzie z_{oj} to wartość j -tej zmiennej w obiekcie wzorcowym oraz z_{-oj} to wartość j -tej zmiennej w obiekcie antywzorcowym. Następnym krokiem jest ustalenie odległości pomiędzy obiektem wzorcowym a wszystkimi obiektami uwzględnionymi w badaniu:

$$d_{i0} = \sqrt{\sum_{j=1}^p (z_{ij} - z_{oj})^2} \quad (4)$$

gdzie z_{oj} oznacza punkt wzorca, z_{ij} to wartość j -tej zmiennej i -tego obiektu oraz $i = 1, 2, 3, \dots, n$, przy czym n to liczba badanych obiektów. Ostatecznie miarę taksonomiczną oblicza się za pomocą wzoru (5):

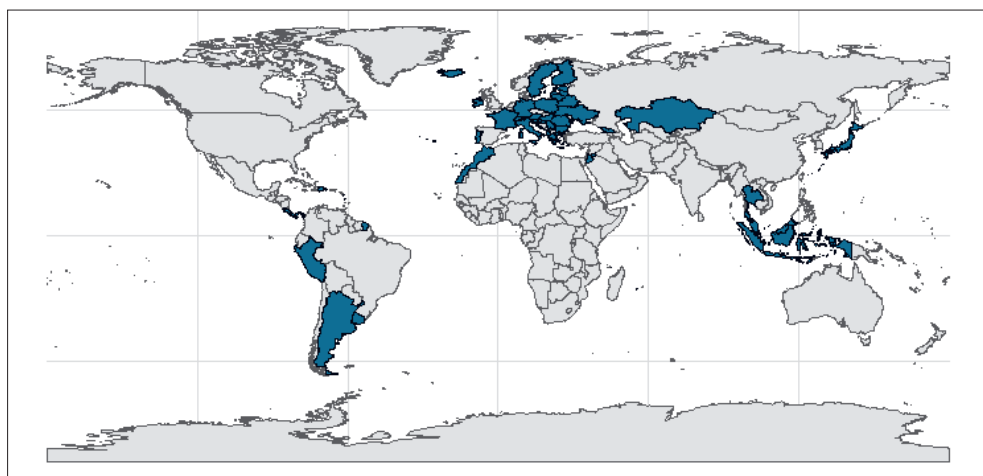
$$m_i = 1 - \frac{d_{i0}}{d_0} \quad (5)$$

Wartości wyznaczonej miary zawierają się w przedziale $[0; 1]$. W przypadku antywzorca miara ta wynosi 0, natomiast w przypadku wzorca wynosi 1. Ranking badanych obiektów jest tworzony przez posortowanie obiektów malejąco według wyznaczonej miary taksonomicznej.

4. OPIS DANYCH

Ze względu na dostępność danych w badaniu wzięto pod uwagę 38 krajów z różnych części świata. Większość z tych państw leży na kontynencie europejskim, jednak zauważalne są znaczące różnice między nimi w zakresie polityki rodzinnej. Przykładowo państwa Europy Północnej słyną z bardzo równościowej polityki i innowacyjnego systemu edukacji, który może być postrzegany jako interesujący z perspektywy Polaków. Ponadto są to kraje z wysokim odsetkiem kobiet pracujących w porównaniu z resztą Europy. Z drugiej strony kraje śródziemnomorskie lub kraje Europy Wschodniej mają tendencję do przyjmowania bardziej tradycyjnych podejść w kwestiach rodzinnych.

W badaniu uwzględniono również kraje azjatyckie (Indonezję, Japonię, Kazachstan, Malezję, Jordanię, Tajlandię), które diametralnie różnią się od krajów europejskich pod względem kulturalnym, religijnym oraz światopoglądowym. Wzięto również pod uwagę kraje Ameryki Południowej (Argentynę, Peru, Urugwaj) oraz Ameryki Środkowej i Karaibów (Kostarykę, Republikę Dominikańską, Panamę). Dodatkowo zgromadzono również dane dla jednego kraju afrykańskiego (Maroka). Różnorodność geograficzna i kulturowa pozwala na bardziej wszechstronne zrozumienie polityki rodzinnej i jej różnic między kontynentami. Wszystkie uwzględnione kraje (czyli Albania, Republika Dominikańska, Indonezja, Łotwa, Serbia, Argentyna, Estonia, Irlandia, Maroko, Słowenia, Austria, Finlandia, Islandia, Malezja, Szwecja, Bułgaria, Francja, Włochy, Panama, Tajlandia, Białoruś, Gruzja, Jordania, Peru, Ukraina, Szwajcaria, Grecja, Japonia, Polska, Urugwaj, Kostaryka, Chorwacja, Kazachstan, Portugalia, Niemcy, Węgry, Litwa, Rumunia) przedstawione zostały na rysunku 1.



Rys. 1. Mapa państw uwzględnionych w badaniu

W niniejszej pracy do utworzenia rankingu wymienionych krajów wzięto pod uwagę 20 zmiennych diagnostycznych dotyczących 5 obszarów związanych z byciem rodzicem: **środowisko, praca, państwo, zdrowie, szkolnictwo**.

W kategorii „**środowisko**” zidentyfikowano dwie zmienne diagnostyczne: odsetek powierzchni państwowej pokrytej terenami leśnymi oraz całkowitą emisję CO₂ na obywatela danego państwa (podaną w tonach). Dane te pobrano ze stron Food and Agriculture Organization of the United Nations [11] oraz Gapminder [12]. Czynniki te zostały uwzględnione w badaniu, ponieważ stan środowiska, w jakim ludzie żyją, bezpośrednio wpływa na ich zdrowie, co przekłada się na jakość ich życia. Dla rozwoju dziecka również bardzo ważny jest kontakt z naturą i przebywanie na świeżym powietrzu, np. w celu rozwoju odpowiedniego systemu odpornościowego.

W tabeli 3 przedstawiono wartości statystyk opisowych zmiennych uwzględnionych w kategorii środowisko. Zmienna „tereny leśne” jest zakwalifikowana jako stymulanta, ponieważ

większa ilość terenów zielonych sprzyja rodzinom. Zmienna „emisja CO₂” jest zakwalifikowana jako destymulanta, ponieważ gorsza jakość powietrza bezpośrednio zagraża zdrowiu. W przypadku obydwóch zmiennych można stwierdzić znaczne zróżnicowanie wśród badanych państw. Najwięcej terenów leśnych jest w Finlandii, a najmniej w Islandii, co wynika z ciężkich warunków pogodowych, jakie występują w tym kraju. Najgorszą jakość powietrza zaobserwowano w Kazachstanie, a najlepszą w Kostaryce.

Tabela 3. Wartości statystyk opisowych zmiennych z obszaru „środowisko”

Statystyka	Tereny leśne [%]	Emisja CO ₂ [t/osobę]
Średnia	36,50	5,06
Odchylenie standardowe	19,31	2,65
Współczynnik zmienności	0,53	0,52
Maksimum	73,70	14,40
Minimum	0,50	1,50

Następnym obszarem uwzględnionym w badaniu jest „praca”. Skupiono na nim szczególną uwagę, dlatego też obejmuje największą liczbę zmiennych diagnostycznych. Wszystkie dane z tego obszaru pobrano z OECD Family Database [13]. Sposób wykonywania pracy w badanych państwach wyraźnie wpływa na decyzje dotyczące posiadania potomstwa. Jednym z głównych czynników w tym obszarze jest obawa przed utratą pracy, co może wiązać się z trudnościami w utrzymaniu rodziny. Krótkie i nieopłacane urlopy rodzicielskie również mogą zniechęcać młodych ludzi do zakładania rodziny. Szczególnie ważne jest to w obecnych czasach, kiedy dla coraz większej liczby osób ważniejszy jest rozwój kariery niż posiadanie dzieci. W obszarze pracy zidentyfikowano następujące zmienne diagnostyczne:

- „Równość urlopu rodzicielskiego” – zmienna określająca, czy system urlopów rodzicielskich jest stworzony tak, aby wspierać również ojców w zajmowaniu się dziećmi. Przyjmuje ona wartości od 1 do 5, gdzie 5 oznacza najlepszą sytuację, a 1 oznacza najgorszą sytuację.
- „Ochrona pracy ojca” – zmienna określająca, czy ojcowie mają zapewnioną ochronę pracy w trakcie urlopu ojcowskiego. Przyjmuje wartości od 1 do 5, gdzie 5 oznacza najlepszą sytuację, a 1 oznacza najgorszą sytuację.
- „Ochrona pracy matki” – zmienna analogiczna do zmiennej „ochrona pracy ojca”, ale dotycząca sytuacji matek.
- „Okres karmienia piersią” – zmienna określająca długość okresu urlopu przysługującego matkom ze względu na okres karmienia piersią. Zmienna ta przyjmuje wartości od 1 do 5, gdzie 5 oznacza najdłuższy czas trwania urlopu, a 1 oznacza brak takiego urlopu.
- „Urlop zdrowotny” – zmienna określająca, czy rodzicowi przysługuje urlop ze względu na problemy zdrowotne dziecka. Zmienna ta przyjmuje wartości od 1 do 5, gdzie 5 oznacza najdłuższy czas trwania urlopu, a 1 oznacza brak takiego urlopu.

- „Urlop macierzyński” – zmienna określająca długość urlopu macierzyńskiego. Przyjmuje ona wartości od 1 do 5, gdzie 5 oznacza najdłuższy czas trwania urlopu, a 1 oznacza brak płatnego urlopu.
- „Urlop tacierzyński” – zmienna analogiczna do zmiennej diagnostycznej „urlop macierzyński”, ale dotycząca urlopu dla ojców.

Wartości statystyk opisowych zmiennych z obszaru związanego z pracą przedstawiono w tabeli 4. Wszystkie zmienne w tym obszarze zostały zakwalifikowane jako stymulanty.

Największą zmiennością cechują się zmienne diagnostyczne dotyczące ojców, takie jak „urlop tacierzyński” i „ochrona pracy ojca”, a najmniejszą – zmienne dotyczące matek, czyli „ochrona pracy matki” oraz „urlop macierzyński”. Pozostałe cechy wykazują znaczną zmienność powyżej 0,46. Warto zauważyć, że każda zmienna przyjmuje maksymalną wartość 5, co oznacza najlepszą sytuację. Natomiast w przypadku zmiennych diagnostycznych dotyczących matek minimum nigdy nie osiąga 1, co oznaczałoby, że państwo nie przewiduje płatnego urlopu macierzyńskiego. Z kolei w przypadku zmiennych dotyczących ojców niektóre badane państwa, takie jak Albania czy Szwajcaria, nie przewidują płatnego urlopu ojcowskiego.

Tabela 4. Wartości statystyk opisowych zmiennych z obszaru „praca”

Statystyka	Równość urlopu rodzicielskiego	Ochrona pracy ojca	Ochrona pracy matki	Okres karmienia piersią	Urlop zdrowotny	Urlop macierzyński	Urlop tacierzyński
Średnia	3,03	2,89	4,66	4,37	3,39	3,92	3,42
Odchylenie standardowe	1,40	1,57	0,90	1,46	1,91	1,16	1,79
Współczynnik zmienności	0,46	0,54	0,19	0,33	0,56	0,29	0,52
Maksimum	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00
Minimum	1,00	1,00	2,00	1,00	1,00	2,00	1,00

Trzecim uwzględnionym w pracy obszarem jest **„państwo”**. Ujęto w nim sytuację gospodarczą badanych krajów oraz politykę prowadzoną w kluczowych dla rodziców obszarach. W krajach o stabilniejszej gospodarce rodzice mogą czuć się bezpieczniej, ponieważ łatwiej będzie im utrzymać rodzinę, co często bywa kosztowne. Dodatkowo wydatki mogą znacznie wzrosnąć w przypadku, gdy dzieci borykają się z problemami zdrowotnymi. W tym obszarze uwzględniono także wydatki na edukację, które również mogą odgrywać istotną rolę w podejmowaniu decyzji dotyczących posiadania potomstwa. Rodzicom zależy na zapewnieniu swoim dzieciom jak najlepszej edukacji, która pomoże im odnieść sukces w przyszłości.

Ogólnie w ramach tego obszaru zidentyfikowano następujące zmienne:

- „*Global peace index*” – wskaźnik bezpieczeństwa kraju; im niższy, tym kraj jest uznawany za bezpieczniejszy.
- „Pomoc dla dzieci niepełnosprawnych” – zmienna określająca, w jakich kwotach państwo zapewnia wsparcie dla rodzin z dziećmi niepełnosprawnymi. Zmienna ta przyjmuje wartości od 1 do 5, gdzie 5 oznacza najwyższą kwotę, a 1 najniższą.
- „Średni przychód” [euro] – przeciętny przychód na gospodarstwo domowe w danym kraju.
- „Odsetek zarobków kobiecych” – odsetek zarobków kobiet w zarobkach ogółem.
- „Wydatki na edukację” – odsetek wydatków na edukację w wydatkach rządowych ogółem.
- „Wydatki na zdrowie matek i dzieci” – odsetek wydatków rządu na zdrowie matek i dzieci w wydatkach na zdrowie ogółem.

W tabeli 5 przedstawiono statystyki opisowe zmiennych z obszaru „państwo”. W tym obszarze występuje jedna zmienna o charakterze nominanty i jest to „odsetek zarobków kobiecych”. Dane dotyczące zarobków kobiet pobrano ze strony World Bank Gender Data Portal [14]. W przypadku tej zmiennej pożądaną wartością jest 0,5, ponieważ oznacza ona, że zarobki kobiet są takie same jak zarobki mężczyzn. „*Global peace index*” jest destymulantą, ponieważ im niższa wartość tej zmiennej, tym bezpieczniejszy jest kraj. Dane te pobrano ze strony Vision of Humanity [15]. Pozostałe zmienne diagnostyczne z tego obszaru to stymulanty. Pochodzą one ze stron OECD Family Database [13], Gapminder [16], The World Bank [17] oraz World Health Organization [18].

W tym obszarze można zaobserwować mniejszą zmienność wśród państw w porównaniu z poprzednimi dwoma obszarami. Największe zróżnicowanie występuje w zmiennej „średni przychód”, gdzie najwyższą wartość odnotowano w Irlandii, a najniższą w Indonezji.

Tabela 5. Wartości statystyk opisowych zmiennych z obszaru „państwo”

Statystyka	<i>Global peace index</i>	Pomoc dla dzieci niepełnosprawnych	Średni przychód [euro]	Odsetek zarobków kobiecych [%]	Wydatki na edukację [%]	Wydatki na zdrowie matek i dzieci [%]
Średnia	1,49	4,21	11 701,58	37,00	4,59	76,13
Odchylenie standardowe	0,45	1,40	6534,93	7,00	1,12	7,43
Współczynnik zmienności	0,30	0,33	0,56	20,00	0,24	0,10
Maksimum	3,47	5,00	25 900,00	45,00	7,73	87,00
Minimum	1,00	1,00	2810,00	11,00	2,98	59,00

Kolejnym rozważanym obszarem jest „**zdrowie**”. Problemy zdrowotne mogą znacząco podwyższyć koszty utrzymania. Ponadto w krajach z nie najlepiej rozwiniętą opieką medyczną czy utrudnionym dostępem do niej kobiety niechętnie będą się decydowały na dziecko. Okres ciąży to czas, w którym kobieta potrzebuje wsparcia i profesjonalnej pomocy. Dotyczy to również porodu, który może zakończyć się tragedią w przypadku braku odpowiedniej opieki medycznej. W obszarze zdrowia należy również pamiętać o dobrobycie psychicznym. W kategorii zdrowie zidentyfikowano następujące zmienne diagnostyczne:

- „Samobójstwo najmłodszych” – liczba samobójstw na 100 000 osób w wieku 15–19 lat.
- „Umieralność noworodków” – liczba zmarłych noworodków na 1000 urodzeń.
- „Umieralność matek” – liczba zmarłych kobiet w ciąży lub w trakcie roku po porodzie na 1000 urodzeń.

W tabeli 6 przedstawiono wartości statystyk opisowych dla zmiennych z obszaru dotyczącego zdrowia. Każda z nich została uznana za destymulantę, ponieważ pożądane są ich niskie wartości. Dane pobrano ze stron OECD Family Database [13], Gapminder [19] oraz Our World in Data [20].

Zmienne dotyczące zdrowia charakteryzują się wysoką zmiennością wśród badanych państw. W przypadku pierwszej zmiennej – „samobójstwo najmłodszych” – ponad 18 samobójstw najmłodszych na 100 000 osób odnotowano w Islandii, natomiast tylko 1 samobójstwo na 100 000 osób w Grecji. Następną zmienną, czyli „umieralność noworodków” (o jeszcze wyższej zmienności wśród badanych państw – 0,88), osiąga najwyższe wartości w Republice Dominikańskiej – ponad 21 zgonów. Najmniejszą umieralnością noworodków może się natomiast poszczycić Estonia. Ostatnia zmienna diagnostyczna z tego obszaru („umieralność matek”) charakteryzuje się niezwykle wysoką zmiennością, ponieważ odchylenie standardowe tej zmiennej jest wyższe niż jej średnia. Najgorsza sytuacja w tym obszarze występuje w Indonezji, natomiast najlepsza w Islandii.

Tabela 6. Wartości statystyk opisowych zmiennych z obszaru „zdrowie”

Statystyka	Samobójstwo najmłodszych (na 100 000)	Umieralność noworodków (na 1000)	Umieralność matek (na 1000)
Średnia	6,04	6,04	24,68
Odchylenie standardowe	3,82	5,31	31,51
Współczynnik zmienności	0,63	0,88	1,28
Maksimum	18,24	27,30	136,00
Minimum	1,16	1,60	2,03

Ostatnim obszarem branym pod uwagę w badaniu jest „szkolnictwo”. W kategorii tej uwzględniono dwie zmienne: odsetek dzieci, które zgłosiły, że ktoś się nad nimi znęca w szkole, oraz odsetek dzieci, które są zadowolone ze swojego życia. Wszystkie dane z tego obszaru pobrano z publikacji *PISA 2018. Insights and Interpretations* [21]. W tabeli 7 przedstawiono wartości statystyk opisowych dla dwóch zmiennych diagnostycznych. Zmienna „odsetek doświadczających znęcania się” to destymulanta, natomiast „odsetek zadowolonych uczniów” to stymulanta. Na podstawie statystyk można wywnioskować, że zmienność wśród badanych państw w obszarze „szkolnictwo” jest dosyć mała. Przeciętnie znęcania w szkole doświadcza 26,34% uczniów, a 71,06% uważa, że jest zadowolonych ze swojego życia.

Tabela 7. Wartości statystyk opisowych charakterystyk z obszaru „szkolnictwo”

Statystyka	Odsetek uczniów doświadczających znęcania się [%]	Odsetek uczniów zadowolonych [%]
Średnia	26,34	71,06
Odchylenie standardowe	7,53	7,51
Współczynnik zmienności	0,29	0,11
Maksimum	43,86	86,95
Minimum	13,67	50,25

5. ANALIZA WYNIKÓW I WNIOSKI

Wykorzystując metodę Hellwiga oraz opisane w poprzednim rozdziale zmienne, utworzono ranking państw sprzyjających rodzicielstwu. Uzyskane wyniki zaprezentowano w tabeli 8.

Tabela 8. Ranking państw sprzyjających rodzicielstwu

Miejsce w rankingu	Państwo	m_i	Miejsce w rankingu	Państwo	m_i
1	Szwecja	0,79	20	Rumunia	0,56
2	Portugalia	0,71	21	Islandia	0,56
3	Austria	0,71	22	Urugwaj	0,56
4	Chorwacja	0,69	23	Polska	0,55

Tabela 8 cd.

Miejsce w rankingu	Państwo	m_i	Miejsce w rankingu	Państwo	m_i
5	Francja	0,69	24	Serbia	0,55
6	Słowenia	0,68	25	Japonia	0,54
7	Finlandia	0,68	26	Peru	0,53
8	Niemcy	0,67	27	Argentyna	0,51
9	Estonia	0,65	28	Albania	0,50
10	Litwa	0,65	29	Panama	0,50
11	Włochy	0,65	30	Tajlandia	0,48
12	Węgry	0,64	31	Ukraina	0,46
13	Szwajcaria	0,62	32	Gruzja	0,45
14	Kostaryka	0,61	33	Malezja	0,43
15	Łotwa	0,61	34	Republika Dominikańska	0,40
16	Bułgaria	0,61	35	Maroko	0,37
17	Grecja	0,58	36	Kazachstan	0,37
18	Irlandia	0,57	37	Indonezja	0,33
19	Białoruś	0,57	38	Jordania	0,30

Zgodnie z wynikami przeprowadzonego badania Szwecja to najlepszy kraj do posiadania dzieci. Jest to zgodne z rankingiem opracowanym przez UNICEF [5], gdzie Szwecja znalazła się w gronie najlepszych państw, a szczególnie imponujące wyniki osiągnęła w obszarze zdrowia fizycznego dzieci. W przeprowadzonym badaniu Szwecja najbardziej wyróżnia się w obszarze pracy, będąc jednym z trzech państw (obok Austrii i Niemiec), które uzyskały wynik 5 (najlepszy możliwy) we wszystkich zmiennych diagnostycznych z tego obszaru. Dodatkowo kraj ten charakteryzuje się najniższą roczną emisją CO₂ w Europie, wynoszącą 3,42 tony na obywatela. Oferuje także najwyższe pokrycie wydatków związanych ze zdrowiem matek i dzieci (sięgające 87%) wśród wszystkich badanych państw. W zakresie wydatków państwowych Szwecja również wyróżnia się wysokimi nakładami na edukację, wynoszącymi 6,7%, co jest drugim najwyższym wynikiem.

Drugie i trzecie miejsce w rankingu zajęły odpowiednio Portugalia i Austria. Wyniki te różnią się znacząco od rankingu stworzonego przez UNICEF [5], ponieważ tam kraje te uplasowały

się w połowie stawki. Różnice w rezultatach wynikają przede wszystkim z doboru zmiennych. W niniejszym badaniu uwzględniono większą liczbę czynników, w tym te dotyczące urlopów rodzicielskich, ich dostępności oraz płatności. Ranking *Worlds of influence: Understanding what shapes child well-being in rich countries* [5] nie uwzględniał tych zmiennych, a zarówno Portugalia, jak i Austria to kraje, które osiągają w nich najlepsze możliwe wyniki (Portugalia tylko w jednej zmiennej – „urlop macierzyński”, ma wynik 4 zamiast 5).

Państwami najmniej sprzyjającymi rodzicielstwu okazały się kraje Azji takie jak Jordania, Indonezja oraz Kazachstan. W wymienionych państwach umieralność matek i noworodków jest znacznie wyższa niż w pozostałych objętych badaniem. Ponadto Indonezja ma najniższy średni przychód na gospodarstwo domowe, Kazachstan najgorszą jakość powietrza i bardzo wysoki współczynnik samobójstw wśród najmłodszych, a Jordania oferuje najniższe pokrycie wydatków na zdrowie matek i dzieci w wysokości 60%. Dodatkowo żadne z tych państw nie zapewnia rodzicom urlopu z powodu problemów zdrowotnych dziecka, a systemy urlopów rodzicielskich nie są stworzone tak, aby pomagać również ojcom w opiece nad dziećmi. Niskie miejsca tych krajów są więc w pełni uzasadnione.

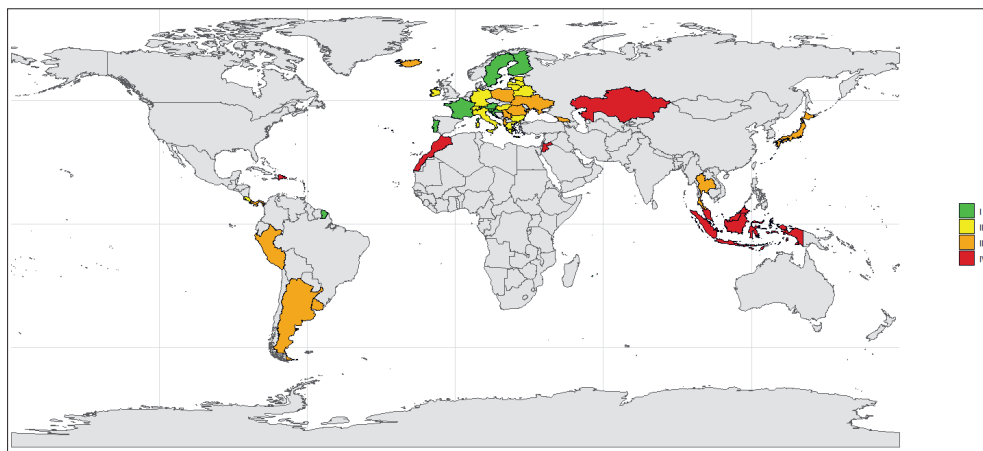
Następnym krokiem w badaniu było podzielenie krajów ze względu na przyjazność rodzicielstwu na cztery grupy o poziomie:

- najwyższym ($m_i > \bar{m} + s_m$),
- ponadprzeciętnym ($\bar{m} \leq m_i < \bar{m} + s_m$),
- mniej niż przeciętnym ($\bar{m} - s_m \leq m_i < \bar{m}$),
- najniższym ($m_i < \bar{m} - s_m$).

gdzie m_i to miara taksonomiczna konkretnego obiektu, $\bar{m}$ to średnia wartość miary taksonomicznej, natomiast s_m to odchylenie standardowe. Wyniki grupowania przedstawiono w tabeli 9 oraz na rysunku 2.

Tabela 9. Podział krajów ze względu na przyjazność rodzicielstwu

	Grupa I	Grupa II	Grupa III	Grupa IV
Państwa	Szwecja Słowenia Portugalia Finlandia Austria Chorwacja Francja	Niemcy Szwajcaria Irlandia Estonia Kostaryka Białoruś Litwa Łotwa Włochy Bułgaria Węgry Grecja	Rumunia Japonia Tajlandia Islandia Peru Ukraina Urugwaj Argentyna Gruzja Polska Albania Serbia Panama	Malezja Jordania Republika Dominikańska Maroko Kazachstan Indonezja



Rys. 2. Mapa krajów z podziałem na grupy

Na rysunku 2 kolorem zielonym oznaczono państwa należące do grupy państw najbardziej sprzyjających rodzielnictwu (I), żółtym należące do ponadprzeciętnej grupy (II), pomarańczowym – do mniej niż przeciętnej grupy (III), oraz czerwonym – do grupy najmniej sprzyjającej rodzielnictwu (IV). W kwestii zróżnicowania przestrzennego mapa wykazuje najlepszą sytuację w Europie oraz najgorszą w Jordanii, Indonezji, Malezji i Kazachstanie.

W tabeli 10 przedstawiono statystyki opisowe poszczególnych zmiennych z uwzględnieniem podziału krajów na cztery grupy.

Tabela 10. Pogrupowane statystyki opisowe zmiennych diagnostycznych

Kategoria	Zmienna	Grupa I		Grupa II		Grupa III		Grupa IV	
		średnia	odch. s.	średnia	odch. s.	średnia	odch. s.	średnia	odch. s.
Środowisko	tereny leśne [%]	50,5	16,2	37,1	13,5	32,4	19,2	27,8	23,5
	emisja CO ₂ [t/osobę]	5,2	1,4	5,5	1,8	4,5	2,5	5,2	4,6
Praca	równość urlopu rodzicielskiego	4,7	0,5	3,1	1,3	2,5	1,2	2,0	1,0
	ochrona pracy ojca	4,4	0,9	3,1	1,5	2,5	1,5	1,5	0,5
	ochrona pracy matki	5,0	0,0	4,6	1,0	4,4	1,1	5,0	0
	okres karmienia piersią	3,9	1,8	5,0	0,0	4,4	1,4	3,7	1,9
	urlop zdrowotny	3,6	1,8	4,7	1,1	2,5	1,9	2,5	1,8
	urlop macierzyński	4,6	0,5	4,4	0,8	3,8	1,2	2,3	0,5
	urlop tacierzyński	5,0	0,0	3,8	1,7	3,1	1,8	1,5	0,5

Tabela 10 cd.

Państwo	<i>global peace index</i>	1,3	0,2	1,4	0,3	1,6	0,6	1,6	0,3
	pomoc dla dzieci niepełnosprawnych	5,0	0,0	4,8	0,8	4,2	1,2	2,2	1,5
	średni przychód [euro]	16 837,0	5231,9	14 448,0	6180,8	9213,1	5179,2	5608,3	2757,8
	odsetek zarobków kobiecych [%]	41,0	03,00	40,00	4,00	38,0	40,0	25,0	9,00
	wydatki na edukację [%]	5,5	0,6	4,8	0,9	4,2	1,3	4,0	0,9
	wydatki na zdrowie matek i dzieci [%]	81,9	4,1	77,7	5,8	75,2	7,1	68,3	7,1
Zdrowie	samobójstwa najmłodszych (na 100 000)	5,6	2,7	5,7	3,3	7,2	4,2	4,9	4,4
	umieralność noworodków (na 1000)	2,6	0,8	3,3	1,3	6,3	3,0	15,0	6,8
	umieralność matek (na 1000)	4,6	1,5	9,3	7,3	28,6	24,7	70,4	9,4
Szkolnictwo	odsetek zadowolonych uczniów [%]	70,4	4,6	70,3	6,1	72,4	8,7	70,5	9,4
	odsetek doświadczających znęcania się [%]	19,0	2,7	25,1	4,7	25,6	5,1	39,1	4,3

Grupa I, w której znalazły się kraje najbardziej sprzyjające rodzicielstwu, w kategorii „środowisko” zdecydowanie przoduje w zmiennej „tereny leśne”. Średnio około 50% powierzchni państwa w krajach z tej grupy pokryte jest lasami. Ponadto widoczny jest spadek średniego pokrycia terenami leśnymi w krajach w kolejnych grupach. Niemniej jednak „emisja CO₂”, czyli druga zmienna diagnostyczna z tego obszaru, nie różnicuje znacznie grup między sobą.

Zdecydowanie największe różnice w średnich wartościach między grupami można zaobserwować w przypadku zmiennych dotyczących pracy ojców, czyli „równość urlopu rodzicielskiego”, „ochrona pracy ojca” oraz „urlop tacierzyński”. Na podstawie tych wyników można wysunąć wnioski, że większość państw dobrze identyfikuje potrzeby związane z macierzyństwem i je zaspokaja, natomiast ich polityka wobec ojców jest znacznie bardziej różnicowana.

W obszarze „państwo” zmienna „średni przychód” charakteryzuje się znacznym zróżnicowaniem w każdej z grup. „Odsetek zarobków kobiecych” utrzymuje się na zbliżonym poziomie w pierwszych trzech grupach, ale grupa IV charakteryzuje się znacznie niższą średnią.

Podobnie w przypadku zmiennej „pomoc dla dzieci niepełnosprawnych”. Grupa I, w której znalazły się kraje najbardziej sprzyjające rodzicielstwu, charakteryzuje się najwyższym średnim poziomem dla zmiennych „wydatki na edukację” oraz „wydatki na zdrowie matek i dzieci”.

Kolejnym badanym obszarem jest zdrowie. Zauważalna jest tutaj znacząca tendencja rosnąca przeciętnej umieralności matek wraz ze spadkiem poziomu grupy. Analogiczna sytuacja występuje w przypadku zmiennej „umieralność noworodków”. Grupa IV bardzo odstaje od pozostałych grup pod względem tych dwóch zmiennych.

W obszarze „szkolnictwo” największe zróżnicowanie wprowadziła zmienna „znęcanie”, gdzie grupa IV, w której znalazły się kraje najmniej sprzyjające rodzicielstwu, znacznie odstaje od pozostałych grup. Średnie wartości drugiej ze zmiennych („odsetek zadowolonych uczniów”) są natomiast dość podobne w przypadku wszystkich grup.

Celem przeprowadzonego badania było znalezienie odpowiedzi na pytanie o to, co musi zostać zmienione w Polsce, aby zwalczyć malejący przyrost naturalny. Można w tym celu porównać Polskę, która w rankingu uplasowała się na 23 miejscu, z krajami z podium, czyli Szwecją, Portugalią oraz Austrią. W tabeli 11 zestawiono wartości poszczególnych zmiennych dla wspomnianych państw. Jasnoszarym kolorem zaznaczono zmienne diagnostyczne, w których Polska wypada zauważalnie gorzej niż pozostałe państwa. Kolor ciemnoszary oznacza zmienną diagnostyczną, w której ta różnica jest znacząca.

Tabela 11. Wartości poszczególnych zmiennych dla Polski, Szwecji, Portugalii oraz Austrii

Kategoria	Zmienna	Polska	Szwecja	Portugalia	Austria
Środowisko	tereny leśne [%]	30,90	68,70	36,10	47,20
	emisja CO ₂ [t/osobę]	8,58	3,42	3,96	7,24
Praca	równość urlopu rodzicielskiego	3,00	5,00	5,00	5,00
	ochrona pracy ojca	3,00	5,00	5,00	5,00
	ochrona pracy matki	3,00	5,00	5,00	5,00
	okres karmienia piersią	5,00	5,00	5,00	5,00
	urlop zdrowotny	1,00	5,00	5,00	5,00
	urlop macierzyński	5,00	5,00	4,00	5,00
	urlop tacierzyński	5,00	5,00	5,00	5,00
Państwo	<i>global peace index</i>	1,60	1,56	1,14	1,07
	pomoc dla dzieci niepełnosprawnych	5,00	5,00	5,00	5,00
	średni przychód [euro]	9710,00	22 500,00	10 800,00	21 200,00
	odsetek zarobków kobiecych [%]	0,40	0,42	0,44	0,35
	wydatki na edukację [%]	4,94	6,68	4,71	4,99
	wydatki na zdrowie matek i dzieci [%]	74,00	87,00	84,00	82,00

Tabela 11 cd.

Zdrowie	samobójstwo najmłodszych (na 100 000)	5,04	6,69	1,81	6,67
	umieralność noworodków (na 1000)	3,70	2,00	2,50	3,00
	umieralność matek (na 1000)	3,73	2,55	6,20	3,12
Szkolnictwo	odsetek zadowolonych uczniów [%]	61,88	66,71	68,88	69,60
	odsetek doświadczających znęcania się [%]	26,36	19,27	13,67	23,17

Skupiając się na zmiennych z obszaru środowiska, można zauważyć, że Polska zdecydowanie odstaje od pozostałych krajów, szczególnie od Szwecji. Przez pewien czas w polskich mediach nagłaśniany był temat wylesiania i wiążących się z tym konsekwencji. Niemniej jednak państwo działa w kierunku zwiększania ilości terenów leśnych, których powierzchnia od lat 90. wzrosła o 6%. Jeżeli chodzi o kolejną zmienną – „emisja CO₂”, również można zauważyć, że Polska wypada gorzej od pozostałych państw z czołówki rankingu. Różnica wynosi co najmniej 1,3 tony emisji. W tym obszarze Polska oraz Unia Europejska prężnie działają, aby polepszyć tę sytuację. Wprowadzane są takie programy jak *Fit for 55* lub opodatkowanie niektórych pojazdów spalinowych. Niestety ponieważ węgiel kamienny i brunatny są głównymi źródłami energii w Polsce, działania te mogą być niewystarczające. W Szwecji aż 52% w całym koszyku energetycznym ma energia odnawialna i jest to najlepszy wynik w Unii Europejskiej. Ponadto blisko 83% energii elektrycznej produkowanej w Szwecji powstaje z energii atomowej oraz w hydroelektrowniach [22, 23].

Ostatnia zmienna diagnostyczna oznaczona kolorem jasnoszarym to „wydatki na zdrowie matek i dzieci”. W Polsce dofinansowanie dla tego obszaru wynosi 74%, gdzie w krajach z czołówki rankingu jest to co najmniej 82%. Kontynuując temat obszaru ochrony zdrowia, należy dodać, że w Polsce w 2020 roku zarejestrowano najmniejszą liczbę lekarzy (2,4) przypadających na 1000 pacjentów w całej Europie. W Austrii ta liczba wynosi 5,4 na 1000 pacjentów, a w Portugalii 5,2 na 1000 pacjentów. Jak podaje Światowa Organizacja Zdrowia, zalecana minimalna liczba lekarzy na 1000 pacjentów wynosi 3,1 [24].

Ostatnim obszarem, w którym widoczne są znaczne różnice między Polską a innymi krajami, jest „praca”. W tej kategorii Polska najbardziej odstaje od pozostałych państw. W przypadku zmiennych związanych z ochroną pracy wartości 3 przy niniejszych zmiennych oznaczają, że ochrona pracy jest gwarantowana tylko przez pewien okres urlopu rodzicielskiego. Z ubiegłorocznego sondażu Ipsos dla OKO.press wynika, że według 41% badanych kobiet głównym powodem, dla którego nie decydują się one na zostanie matką, jest lęk przed utratą pracy [25]. W pozostałych państwach z tabeli sytuacja jest odmienna – obydwoje z rodziców mają zagwarantowaną ochronę pracy przez całość urlopu rodzicielskiego. W kwestii zmiennej diagnostycznej „równość urlopu rodzicielskiego”, wartość 3 oznacza natomiast, że dla ojca przewidziany jest w praktyce urlop o długości 2 tygodni lub krótszy. W Polsce, nawet pomimo wprowadzenia w życie nowelizacji Kodeksu pracy z 9 marca 2023 r. dotyczącej *work-life balance*, ojcu nadal przysługuje jedynie do 2 tygodni urlopu ojcowskiego, a matce – 20 tygodni. Płatność urlopu jest zwykle na poziomie 60%. W Szwecji rodzice mają prawo do 480 dni urlopu, w czasie którego otrzymują 80% wynagrodzenia. Ponadto

płatne świadczenia otrzymują też rodzice niezatrudnieni. Dodatkowo rodzice mają możliwość zredukowania ich standardowego czasu pracy o 25% do czasu ukończenia przez dziecko 8 lat [26]. W Austrii z kolei rodzice mogą spędzić aż do trzech pierwszych lat dziecka na urlopie rodzicielskim, cały czas otrzymując zasiłek. Ponadto minimum 6 miesięcy musi być wykorzystane przez ojca i przez matkę. Austria jest krajem bardzo hojnym w kwestiach urlopów rodzicielskich [27].

Od wielu lat rządzący zmagają się z problemem starzejącego się społeczeństwa i ich dotychczasowe działania nie przynosiły skutków. Analiza rankingu państw sprzyjających rodzicielstwu wykazała, że Polska najbardziej odstaje w obszarach „praca” oraz „środowisko”. Ponadto rząd zapewnia zbyt niskie pokrycie wydatków na zdrowie matek i dzieci. Rozwiązaniem problemu z ujemnym oraz malejącym przyrostem naturalnym w kraju mogą okazać się diametralne zmiany w wymienionych obszarach. Podjęte działania mogą przełożyć się na wzrost przyrostu naturalnego w Polsce.

6. PODSUMOWANIE

W przeprowadzonym badaniu przeanalizowano pięć obszarów wpływających na rodzicielstwo: „środowisko”, „praca”, „państwo”, „zdrowie” oraz „szkolnictwo”. Z wykorzystaniem wielowymiarowej analizy porównawczej stworzono ranking 38 krajów świata oraz podzielono je na cztery grupy według wyznaczonej miary taksonomicznej.

Analiza uzyskanych wyników wykazała, że różnice między najlepszą grupą (grupa I) a pozostałymi są szczególnie zauważalne w obszarach związanych z rodzicielstwem i pracą, gdzie polityka dotycząca pracy ojców wprowadza największe zróżnicowanie. Ponadto grupa z krajami najbardziej sprzyjającymi rodzicielstwu osiąga przewagę w obszarach średniego przychodu oraz wydatków na edukację i zdrowie, co wskazuje na silną politykę społeczną i znaczące wsparcie dla rodzin w tych krajach. W przypadku krajów z pozostałych grup wyróżnić można pewne obszary, nad którymi należałoby pracować. Szczególnie kraje z grupy IV odstają od pozostałych m.in. ze względu na wysoką umieralność matek i noworodków.

W zbudowanym rankingu krajów sprzyjających rodzicielstwu Polska zajęła 23 miejsce. Na podstawie przeprowadzonej analizy można stwierdzić, że chcąc zwiększyć przyrost naturalny w Polsce, rząd powinien przede wszystkim podjąć działania mające na celu zmianę polityki urlopów rodzicielskich. Analiza pokazała, że Polska zdecydowanie odstaje pod tym względem od krajów z czołówki rankingu. Urlopy rodzicielskie są jednak niezwykle ważne i mają wpływ na decyzje dotyczące powiększania rodziny. Dodatkowo rząd powinien zainwestować w odnawialne źródła energii, ponieważ sytuacja środowiskowa kraju nie jest najlepsza, a także może wpływać na decyzję o rodzicielstwie.

LITERATURA

- [1] Nauka w Polsce, *Francja nadal współliderką pod względem dzietności w Europie*, 2014, <https://naukawpolsce.pl/aktualnosci/news,401778,francja-nadal-wspolliderka-pod-wzgledem-dzietnosci-w-europie.html> [dostęp: 16.02.2024].

- [2] World Population Review, *Average age of having first child by country 2024*, <https://worldpopulationreview.com/country-rankings/average-age-of-having-first-child-by-country> [dostęp: 14.02.2024].
- [3] United Nations Economic Commission for Europe, *Mean age of women at birth of first child*, <https://w3.unece.org/PXWeb/en/Table?IndicatorCode=34> [dostęp: 16.02.2024].
- [4] Główny Urząd Statystyczny, *Sytuacja demograficzna Polski do roku 2022, 2023*, <https://stat.gov.pl/obszary-tematyczne/ludnosc/ludnosc/sytuacja-demograficzna-polski-do-roku-2022,40,3.html> [dostęp: 16.02.2024].
- [5] Gromada A., Rees G., Chzhen Y., *Innocenti Report Card 16. Worlds of influence: Understanding what shapes child well-being in rich countries*, UNICEF.
- [6] Kukula K., Luty L., *O wyborze metody porządkowania liniowego do oceny gospodarki odpadami w Polsce w ujęciu przestrzennym*, Problemy Rolnictwa Światowego, t. 18, nr 2, 2018, s. 183–192, <https://doi.org/10.22630/PRS.2018.18.2.46>.
- [7] Hellwig Z., *Zastosowanie metody taksonomicznej do typologicznego podziału krajów ze względu na poziom ich rozwoju oraz zasoby i strukturę wykwalifikowanych kadr*, Przegląd Statystyczny, t. 4, 1968, s. 307–327.
- [8] Balicki A., *Statystyczna analiza wielowymiarowa i jej zastosowania społeczno-ekonomiczne*, Wydawnictwo Uniwersytetu Gdańskiego, Gdańsk 2009.
- [9] Ben-Arieh A., *Background paper prepared for the Education for All Global Monitoring Report 2007. Strong foundations: early childhood care and education. Measuring and monitoring the well-being of young children around the world*, UNESCO, 2006.
- [10] Ahrendt D., Anderson R., Dubois H., Jungblut J.-M., Leončikas T., Pöntinen L., Sándor E., *European quality of life. Survey 2016. Quality of life, quality of public services, and quality of society*, Eurofound, 2018, <https://www.eurofound.europa.eu/en/publications/2018/european-quality-life-survey-2016>.
- [11] Food and Agriculture Organization of the United Nations, <https://www.fao.org/forestry/sofo/en/> [dostęp: 1.12.2023].
- [12] Gapminder, *CO₂ emissions per capita Consumption based, tonnes per*, http://gapm.io/dco2_consumption_historic [dostęp: 1.12.2023].
- [13] OECD, *OECD Family Database*, <https://www.oecd.org/els/family/database.htm> [dostęp: 1.12.2023].
- [14] World Bank. Gender Data Portal, *Labor force participation rate (% of population)*, <https://genderdata.worldbank.org/indicators/sl-tlf-acti-zs/> [dostęp: 1.12.2023].
- [15] Vision of Humanity, *Global Peace Index. Overall GPI Score*, <https://www.visionofhumanity.org/maps/#/> [dostęp: 1.12.2023].
- [16] Gapminder, *dgini income_2100*, <https://www.gapminder.org/data/> [dostęp: 1.12.2023].
- [17] The World Bank, *Government expenditure on education, total (% of GDP)*, <https://data.worldbank.org/indicator/SE.XPD.TOTL.GD.ZS> [dostęp: 1.12.2023].
- [18] World Health Organization, *Health expenditures on Reproductive Health, as % of current health expenditure (CHE)*, [https://platform.who.int/data/maternal-new-born-child-adolescent-ageing/indicator-explorer-new/mca/health-expenditures-on-reproductive-health-as-of-current-health-expenditure-\(che\)](https://platform.who.int/data/maternal-new-born-child-adolescent-ageing/indicator-explorer-new/mca/health-expenditures-on-reproductive-health-as-of-current-health-expenditure-(che)) [dostęp: 1.12.2023].
- [19] Gapminder, *dmmr_ihme*, https://gapm.io/dmme_ihme [dostęp: 1.12.2023].

- [20] Our World in Data, *Suicide rates among young people, 2000 to 2019*, <https://ourworld-indata.org/grapher/suicide-rates-among-young-people> [dostęp: 1.12.2023].
- [21] Schleicher A., *PISA 2018. Insights and Interpretations*, OECD, <https://www.oecd.org/pisa/PISA%202018%20Insights%20and%20Interpretations%20FINAL%20PDF.pdf> [dostęp: 16.02.2024].
- [22] Forum Energii, *Marzec 2024 r. z najwyższym ograniczeniem produkcji energii elektrycznej z jednostek OZE w historii. Maksymalny godzinowy udział OZE w produkcji sięgał 63%*, 2024, <https://www.forum-energii.eu/miesiecznik> [dostęp: 16.02.2024].
- [23] StenaLine, *Zielona energia w Szwecji cz. 2*, <https://blog.stenaline.pl/skandynawia/zielona-energia-w-szwecji-cz-2/> [dostęp: 16.02.2024].
- [24] Ditrich R., *Polska ma najmniej lekarzy w UE. To główna przyczyna kolejek*, Obserwator Gospodarczy, 2022, <https://obserwatorgospodarczy.pl/2022/07/18/polska-ma-najmniej-lekarzy-w-ue-to-glowna-przyczyna-kolejek/> [dostęp: 16.02.2024].
- [25] Infor, *Dlaczego w Polsce rodzi się mniej dzieci? 305 tys. urodzeń w 2022 roku – 386 tys. w 2012 r., 515 tys. w 1992 r.*, 2023, <https://samorzad.infor.pl/wiadomosci/6303333,dlaczego-w-polsce-rodzi-sie-mniej-dzieci-305-tys-urodzen-w-2022-roku-386-tys-w-2012-r-515-tys-w-1992-r.html> [dostęp: 16.02.2024].
- [26] Krupińska-Ziętkowska D., *Urlop macierzyński w Polsce i Europie*, WP Parenting, 2017, <https://parenting.pl/urlop-macierzynskie-w-polsce-i-europie> [dostęp: 14.02.2024].
- [27] Zborowska A., *Urlop rodzicielski w Austrii: Oto, jakie prawa przysługują rodzicom w Austrii*, Polski Obserwator, 2024, <https://polskiobserwator.de/austria/urlop-rodzicielski-w-austrii-2024-co-warto-wiedziec/> [dostęp: 16.02.2024].

Igor Świerczek*

OPRACOWANIE SYSTEMU TELEMETRII BOLIDU WODOROWEGO HYDRIVE 1

W artykule zaprezentowano działanie układu telemetrii bolidu HYDRIVE 1 z ogniwem wodorowym. Omówiono budowę bolidu oraz cel, w jakim został on skonstruowany. Następnie opisano architekturę systemu telemetrii, budowę układów pomiarowych i wskazano lokalizacje zintegrowania ich w układzie elektrycznym. Kolejne sekcje artykułu poświęcono procesowi transmisji danych z układu telemetrii i ich odbioru na urządzeniu zewnętrznym. Na końcu przedstawiono rezultaty w formie wykresów oraz ich opracowanie. Artykuł kończy się omówieniem kierunków rozwoju i rozbudowy systemu telemetrii.

DEVELOPMENT OF TELEMETRY SYSTEM IN HYDROGEN BOLIDE HYDRIVE 1

This article supplies an overview of a telemetry system implemented in a HYDRIVE 1 bolide featuring a hydrogenous drive. It begins by introducing the structure and purpose of the bolide. Subsequently, it delves into the telemetry and measurement systems, detailing their integration within the electric circuit. The process of data transmission from the telemetry systems to data recipients is then explained. Additionally, the article includes an analysis of the bolide's performance through graphical representations, with an examination of the telemetry system's potential for growth and expansion.

1. WPROWADZENIE

Telemetria, będąca zaawansowaną technologią, umożliwia zdalne pomiary oraz przesyłanie danych do odbiorcy znajdującego się w innym miejscu niż urządzenie nadawcze. Technologia ta ma zastosowanie w wielu kluczowych obszarach, w tym w eksploracji kosmosu [1], medycynie [2], biologii [3] oraz zarządzaniu zasobami wodnymi [4], co podkreśla jej wszechstronność i znaczenie w nowoczesnej nauce i technologii. W dziedzinie sportów motorowych, takich jak żużel i Formuła 1 [5], systemy telemetrii odgrywają niezbędną rolę, umożliwiając zdalny monitoring oraz analizę parametrów pracy pojazdów w czasie

* AGH Akademia Górniczo-Hutnicza, Wydział Informatyki Przemysłowej i Inżynierii Metali, Studenckie Koło Naukowe Konstruktorów Mechatryki.

rzeczywistym. Głównym celem implementacji systemu telemetrii w bolidzie HYDRIVE 1 jest monitorowanie kluczowych danych operacyjnych, takich jak temperatura, natężenie oraz napięcie prądu. Do wykonania tych pomiarów zastosowano czujniki prądu, dzielniki napięcia oraz stykowy czujnik temperatury. Zebrane dane są następnie transmitowane z pojazdu do zewnętrznego urządzenia, które wizualizuje pomiary w formie wykresów. Następnie dane są analizowane, co umożliwia identyfikację i korektę błędów konstrukcyjnych w poszczególnych komponentach pojazdu. Ten proces ma kluczowe znaczenie dla bezpieczeństwa i wydajności w sporcie motorowym.

2. OPIS BOLIDU HYDRIVE 1

Bolid HYDRIVE 1 (rys. 1) to produkt zaawansowanej technologii w dziedzinie pojazdów wyścigowych, opracowanej przez członków Studenckiego Koła Naukowego Konstruktorów MechaNICAD. Konstrukcja pojazdu opiera się na kompozycie włókna węglowego, co pozwoliło na uzyskanie minimalnej masy całkowitej wynoszącej 50 kg, włączając w to zainstalowane komponenty. Bolid jest napędzany przez silnik elektryczny, który pobiera energię ze stosu superkondensatorów, zasilany przez ogniwo wodorowe PEM o mocy 500 W, produkcji firmy Horizon [6]. Warto zaznaczyć, że działanie ogniwa wodorowego podlega wpływowi wielu parametrów, takich jak wilgotność, temperatura oraz czystość dostarczanego wodoru. W celu zapewnienia bezpiecznej eksploatacji HYDRIVE 1 został wyposażony w czujnik wodoru połączony z układem bezpieczeństwa. W przypadku wykrycia przecieku system ten natychmiast przerywa przepływ gazu za pomocą elektrozaworu. Przednie dwa koła są sterownicze, natomiast koło tylne jest napędowe i zostało osadzone na module wyprodukowanym technologią druku 3D z proszku. Co więcej, moduł zaprojektowany został z wykorzystaniem technik modelowania generatywnego, co pozwoliło na uzyskanie optymalnych parametrów wydajnościowych. Niezbędne elementy bezpieczeństwa zostały starannie dobrane. Obejmują one oddzielne układy hamulcowe w przypadku przedniej i tylnej osi. Ponadto pojazd wyposażony został w kierownicę z potencjometrem służącym do regulacji prędkości oraz wyświetlacz, który dostarcza informacji o pozostałym czasie wyścigu oraz napięciu na superkondensatorach. Bolid HYDRIVE 1 powstał z myślą o udziale w Shell Eco-marathon [7], w związku z tym kluczowym kryterium jest minimalne zużycie wodoru. Zgodnie z regulaminem zawodów kierowca zobowiązany jest do pokonania dystansu 15 kilometrów na torze wyścigowym w czasie nieprzekraczającym 45 minut.

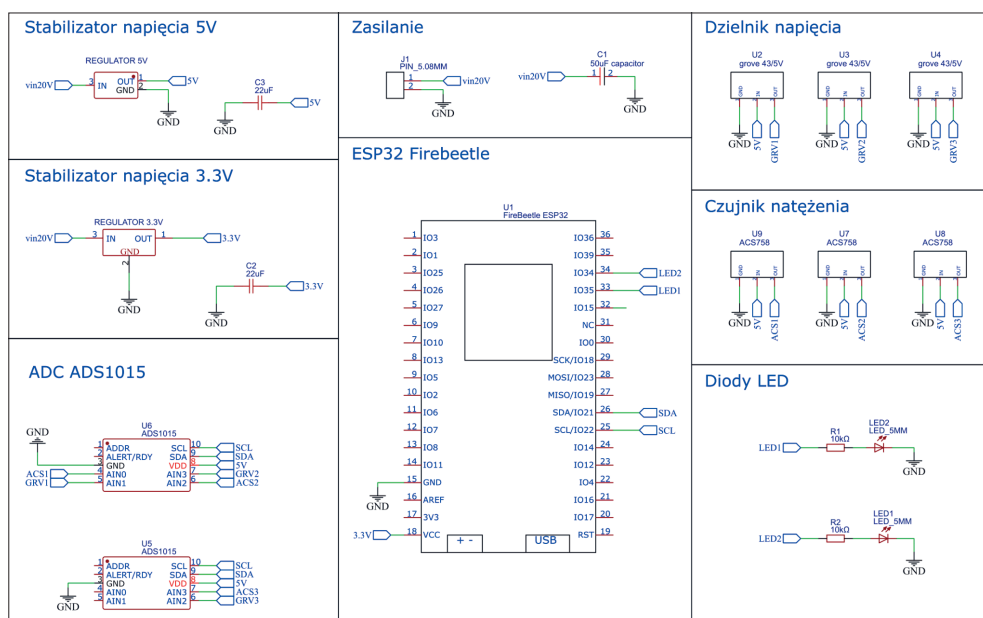


Rys. 1. Bolid HYDRIVE 1

Źródło: [8]

3. BUDOWA UKŁADU TELEMETRII

Głównymi założeniami układu telemetry (rys. 2) były niezawodność i dokładność pomiarów. Dodatkowo transmisja danych miała nie przekraczać częstotliwości 1 Hz. Bazowym mikrokontrolerem systemu telemetry jest ESP32 Fire Beetle. Jest to kompleksowy, wyposażony w dwurdzeniowy procesor Tensilica LX6, mikrokontroler, wykorzystujący moduł Dual-Core ESP-WROOM-32, do komunikacji w trybie Wi-Fi czy Bluetooth v4.2. Ma on 520 kB pamięci RAM oraz 16 MB pamięci flash. Połączony jest z dwoma przetwornikami ADC ADS1015, które zostały zintegrowane z trzema układami pomiarowymi. Przetworniki mają na zadanie modulację sygnału analogowego na cyfrowy.



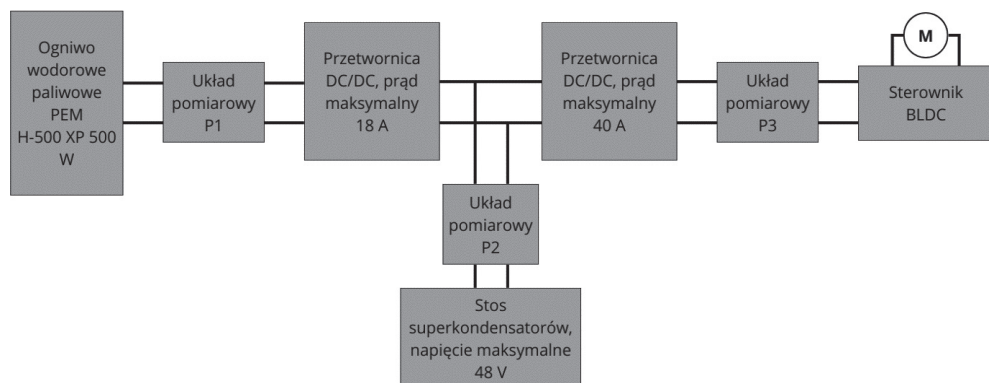
Rys. 2. Schemat systemu telemetry i układów pomiarowych

Źródło: materiały SKNK MechaniCAD

Następnie komunikują się z mikrokontrolerem ESP32 za pomocą interfejsu I2C, wysyłając czas pomiaru linią zegarową SCL i pomiary linią danych SDA. Zabieg ten ma na celu zastąpienie przetwornika ADS, wbudowanego w mikrokontroler ESP32. Zasilanie układu bazuje na zewnętrznej baterii o napięciu 15 V, więc aby zapewnić odpowiednie zasilanie poszczególnych komponentów systemu, zastosowano stabilizatory napięcia 3,3 V i 5 V. W celu zapewnienia informacji zwrotnej dotyczącej poprawnego funkcjonowania mikrokontrolera oraz jego połączenia z siecią Wi-Fi zaimplementowano układ diod sygnalizacyjnych. Jeden układ pomiarowy składa się z dwóch czujników – jednego do pomiaru natężenia prądu, drugiego do pomiaru napięcia prądu. Do pomiaru natężenia prądu używany jest czujnik ACS758, który wykorzystuje efekt Halla do precyzyjnego pomiaru w zakresie od -50 A do 50 A. Jego czułość wynosi 40 mV/A. Moduł ma możliwość pomiaru natężenia

prądu przy stałym i zmiennym napięciu, co jest kluczowe przy pomiarze prądu wychodzącego z ogniwa, gdzie napięcie jest zmienne. Następnie do pomiaru napięcia prądu używany jest dzielnik napięcia Groove 43 V/5 V. Dzielnik mierzy napięcie wejściowe w zakresie od 1 V do 43 V. Następnie modyfikuje to napięcie do zakresu od 0 V do 5 V, dzięki czemu z proporcji można przeliczyć napięcie wejściowe na wyjściowe. Kolejny czujnik to cyfrowy termometr stykowy DS18B20, działający w zakresie od -55°C do 125°C z dokładnością $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$ w zakresie od -10°C do 85°C . Zasilany jest napięciem od 3 V do 5,5 V. Czujnik jest bezpośrednio połączony z mikrokontrolerem ESP32.

Systemy pomiarowe w układzie elektrycznym są rozmieszczone w trzech kluczowych lokalizacjach, oznaczonych na schemacie jako układy pomiarowe P1, P2 i P3 (rys. 3). Ma to zasadnicze znaczenie dla monitorowania przepływu prądu w bolidzie. Układ pomiarowy (P1) umieszczony jest na wyjściu z ogniwa wodorowego H-500 XP, gdzie ze względu na jego specyficzną charakterystykę [9, 10] konieczne są pomiary w różnych warunkach pracy. Dzięki temu można określić optymalną charakterystykę pracy ogniwa.



Rys. 3. Uproszczony schemat blokowy układu elektrycznego

Źródło: [8]

Czujnik (P2) służy do pomiaru napięcia i natężenia prądu stosu superkondensatorów, co pozwala na monitorowanie ilości zgromadzonej energii. Ostatni czujnik (P3) znajduje się bezpośrednio przed kontrolerem silnika. Ma za zadanie monitorowanie przepływu prądu do silnika, co jest kluczowe dla prawidłowego funkcjonowania układu napędowego. Czujnik temperatury jest umieszczony na bocznej ścianie silnika, by stale monitorować temperaturę silnika i w przypadku przegrzania uruchomić działanie układu zabezpieczającego.

4. TRANSMISJA I ODBIÓR PAKIETÓW ORAZ WIZUALIZACJA DANYCH

Mikrokontroler ESP32 jest połączony z Wi-Fi, by za pomocą usługi AWS IoT [11] wysyłać na Broker [12] pakiety w strukturze *json*, używając protokołu MQTT [13]. W jednym pakiecie znajdują się dane takie jak wartości napięcia i natężenia prądu (zmierzonego w trzech punktach

pomiarowych), wartości temperatury oraz czas pomiaru. Mikrokontroler jest zaprogramowany tak, by za pomocą linii SDA pobierać wartości pomiarów, a przy użyciu linii SCL czas pomiaru. Czas pomiaru jest mierzony od uruchomienia ESP32. W funkcji `Collect_electrical_data()`, podczas wykonywania pętli `for` pomiary zapisywane są w tablicy `ads_nodes`. Następnie uzyskane pomiary są modyfikowane przez funkcję `computeVolts()`, ponieważ dane są przekazywane jako sygnały. Tak przygotowane pomiary są teraz używane przez funkcje `CalculateVolt()` i `CalculateAmp()`, które mają obliczyć końcowe wartości danych.

```
void Collect_electrical_data(){
    int16_t results_vt;
    int16_t results_I;
    for (uint8_t i = 0; i < LICZBA_PRZETWORNIKOW; i++){
        ads_nodes[i].get_measurements(results_vt, results_I);
        dane_elektryczne.pomiar_VT[i] = CalculateVolt(ads[i].computeVolts(results_vt));
        dane_elektryczne.pomiar_I[i] = CalculateAmp(ads[i].computeVolts(results_I));
    }
    dane_elektryczne.time = millis();
}
```

Funkcja `CalculateAmp()` jako argument przyjmuje pomiar natężenia prądu z amperomierza. Następnie pomiar zmieniany jest z napięcia z pomocą stałej `NAPIECIE_REFERENCYJNE`. W kolejnym segmencie uwzględnione zostały czułość modułu ACS758 i błąd pomiarowy. Dzięki tym operacjom uzyskano dokładne wartości wyników, obciążone błędem $\pm 0,05$ A.

```
float CalculateAmp(float Measure_VT){
    float pomiar_znormalizowany = Measure_VT - (NAPIECIE_REFERENCYJNE/2);
    float Amp = pomiar_znormalizowany / ACS758_SENSITIVITY_DEFAULT - BLAD_POMIARU;
    return Amp;
}
```

Następnie mikrokontroler przechodzi do funkcji `Send_save_electrical_data()`, która pomiary zapisuje w strukturze `json`. Funkcja tworzy tablicę znaków `mqtt_message[]` i publikuje danych pakiet na serwerze za pomocą protokołu MQTT.

```
void Send_save_electrical_data(){
    StaticJsonDocument<400> doc;
    for (uint8_t i; i < LICZBA_PRZETWORNIKOW; i++){
        doc["pomiar_VT" + std::to_string(i)] = dane_elektryczne.pomiar_VT[i];
        doc["pomiar_I" + std::to_string(i)] = dane_elektryczne.pomiar_I[i]; }
    doc["pomiar_T"] = pomiar_temperatura;
    doc["time_ms"] = dane_elektryczne.time;
    char mqtt_message[400];
    serializeJson(doc, mqtt_message);
    publish_MQTT_message(MQTT_PUBLISH_TOPIC, mqtt_message);
}
```

Na kolejnym etapie za pomocą funkcji `Handle_message()` napisanej w języku *Python* i przy użyciu biblioteki *gspread* dane zapisywane są w usłudze Arkusze Google. Pomiary parametrów odbywają się co około 0,7 s. Należy zwrócić uwagę, że Google API ma limit jednego żądania na sekundę, z tego powodu dwa pakiety łączone są w jeden pakiet, który zostaje wysłany co 1,4 s. Wraz z Arkuszami Google używane jest Apps Scripts, co umożliwia

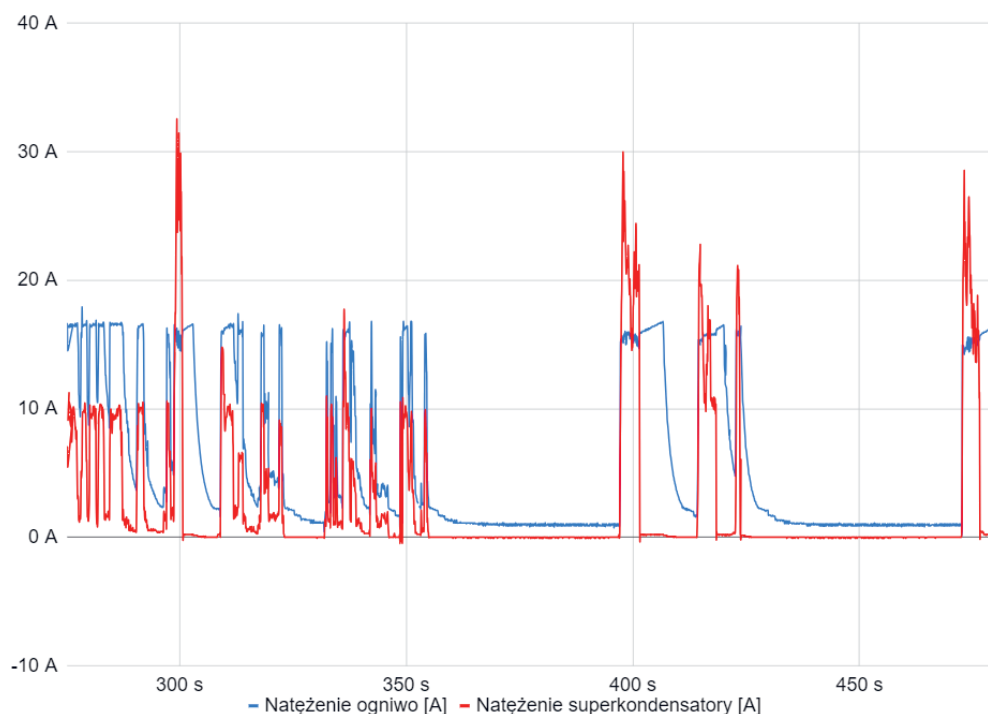
odpowiednie sortowanie odebranych pakietów. Następnie, dzięki wbudowanym funkcjom, dane pomiarowe są dostosowywane do wizualizacji na wykresach.

```
def Handle_message(client, userdata, message):  
    json_str = message.payload.decode('utf-8')  
    json_obj = json.loads(json_str)  
    data = [str(json_obj["time_ms"]), str(json_obj["pomiar_T"]), str(json_obj["pomiar_VT0"]),  
str(json_obj["pomiar_VT1"]), str(json_obj["pomiar_V2"]), str(json_obj["pomiar_I0"]),  
str(json_obj["pomiar_I1"]), str(json_obj["pomiar_I2"])]  
    ...  
    try:  
        google_sheet.wyslij_w_chmure(dane_do_wyslania)  
    except Exception as e:  
        print("An error occurred:", e)
```

5. REZULTATY

Dane zobrazowane na wykresach przedstawiają funkcjonowanie poszczególnych komponentów układu elektrycznego na testowych przejazdach, podczas zawodów Shell Eco-marathon we Francji (Nogaro).

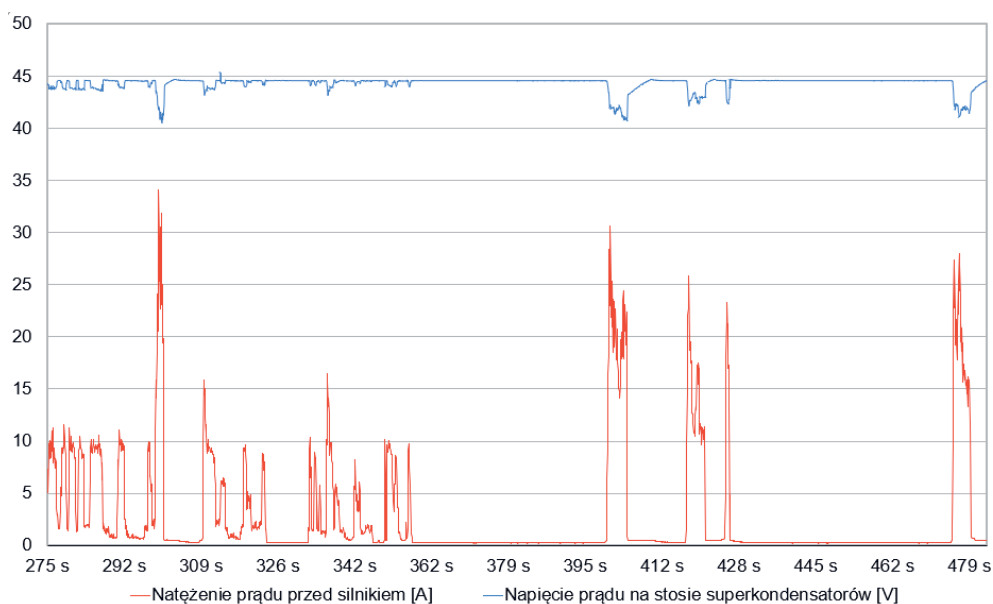
Na wykresie (rys. 4) można zauważyć, że wzrost natężenia prądu na ogniwie odpowiada wzrostowi natężenia prądu na superkondensatorach.



Rys. 4. Fragment wykresu natężenia prądu [A] ogniw oraz stosu superkondensatorów w trakcie przejazdu na zawodach

Oznacza to, że przy przyspieszaniu przez kierowcę do sterownika ogniwa wysyłana jest informacja o zapotrzebowaniu na energię. Energia natomiast pobierana jest z superkondensatorów. W momencie gdy sterownik otrzymuje sygnał o zapotrzebowaniu, ogniwo ładuje superkondensatory. Kiedy natężenie prądu osiąga wartość w przybliżeniu 3 A na ogniwie i 0 A na superkondensatorach, kierowca nie wydaje polecenia przyspieszenia bolidu, a ogniwo wytwarza wówczas minimalną energię potrzebną do zasilenia komponentów elektrycznych w bolidzie. Spadki poniżej 0 A traktuje się jako błędy układów pomiarowych.

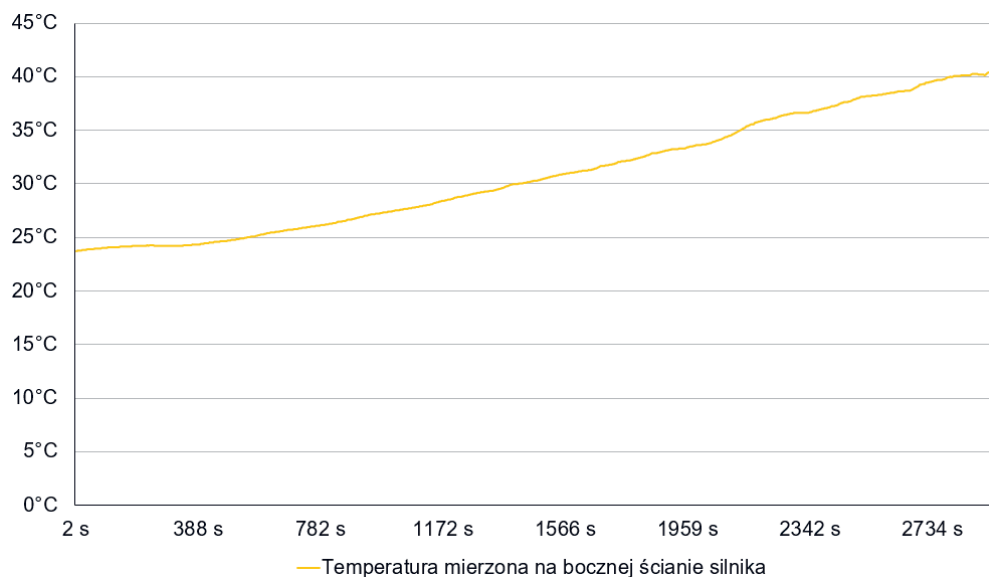
Na wykresie (rys. 5) można zauważyć, jak wartości spadków napięcia na superkondensatorach odpowiadają natężeniom na silniku. Podczas gdy kierowca przyspiesza, energia pobierana jest z superkondensatorów, a nie bezpośrednio z ogniwa, jako że przy zbyt dużym zapotrzebowaniu na energię ogniwo może zostać uszkodzone. Napięcie na superkondensatorach nie spada poniżej 40 V, co świadczy o dobrym działaniu ogniwa, ponieważ nie dopuszcza ono do większych spadków napięcia przy dużym zapotrzebowaniu na energię.



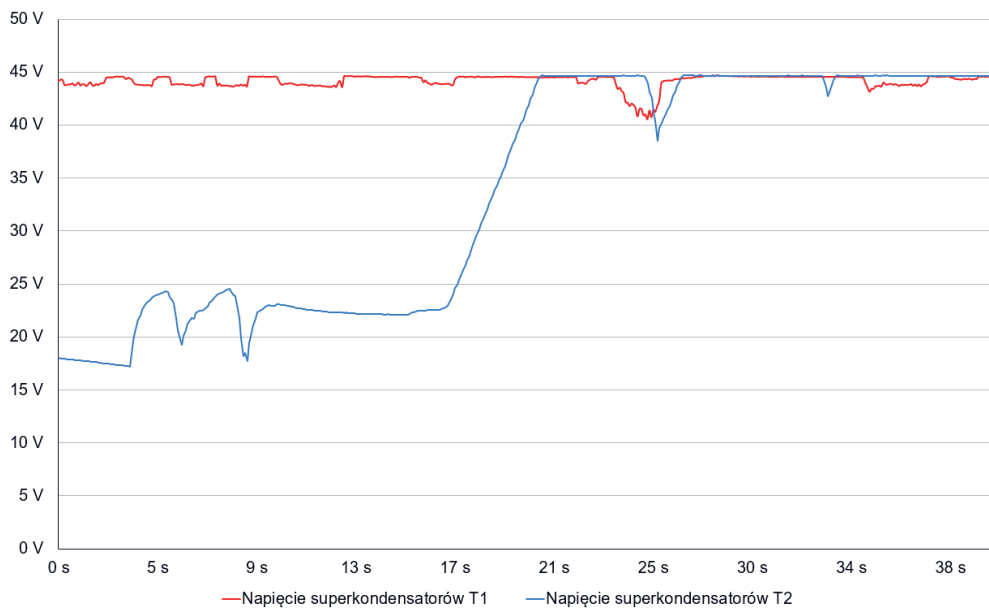
Rys. 5. Fragment wykresu napięcia [V] stosu superkondensatorów oraz natężenia prądu [A] przed silnikiem w trakcie przejazdu

Na wykresie (rys. 6) przedstawiono zależność temperatury silnika od czasu przejazdu. Można zauważyć, że w trakcie przejazdu temperatura silnika sukcesywnie wzrastała. Test trwał 45 minut. Silnik pracuje maksymalnie w temperaturze 50°C, więc dzięki pomiarowi temperatury można wywnioskować, że silnik się nie przegrzewa.

Wykres (rys. 7) obrazuje zmienność napięć w trakcie startu bolidu w dwóch różnych testach.



Rys. 6. Wykres temperatury [°C] mierzonej na bocznej ścianie silnika podczas przejazdu



Rys. 7. Fragment wykresu napięć prądu [V] superkondensatorów podczas dwóch testów (T1 i T2)

W teście T1 (wykres czerwony) superkondensatory zostały naładowane przed startem do napięcia o wartości 45 V. Natomiast w przypadku testu T2 (wykres niebieski) kondensatory zostały naładowane jedynie do około 17,5 V.

Zgodnie z wytycznymi organizatorów, jeśli superkondensatory są naładowane przed rozpoczęciem wyścigu, konieczne jest uzyskanie tej samej wartości naładowania na zakończenie przejazdu. Sprawdzane więc były rozwiązania z niższym naładowaniem superkondensatorów (test T2), co umożliwiałoby utrzymanie niższej wartości na końcu przejazdu. Jednakże ze względu na długi czas (20 s) ładowania superkondensatorów na samym początku wyścigu zostało przyjęte rozwiązanie z ładowaniem kondensatorów do wartości 45 V.

6. WNIOSKI

Podsumowując, można stwierdzić, że system telemetrii działa zgodnie z założeniami i pozwala na analizę działania bolidu, dzięki której zoptymalizowano układ elektryczny. Wykorzystując zebrane dane, można było wysterować przetwornicę DC/DC na odpowiednie natężenie, by zoptymalizować działanie ogniwa wodorowego paliwowego. Przeprowadzono testy ładowania superkondensatorów przy starcie. Monitorowano temperaturę silnika, by nie doprowadzić do jego przegrzania. Informacja o napięciu na stosie superkondensatorów zostaje wysyłana cyfrowo do kierowcy, aby wiedział, kiedy są naładowane i tym samym, kiedy może przyspieszać.

7. KIERUNKI ROZWOJU

System telemetrii opisany w artykule jest prototypem, w którym docelowo można wprowadzić magistralę CAN dla ułatwienia skalowalności całego układu. Dodatkowo zbieranymi danymi są między innymi prędkość jazdy czy położenie na torze. Pomiary prędkości mogą być zbierane z enkodera sterownika silnika i mogą być wysyłane analogowo do mikrokontrolera ESP32. Z kolei do pomiaru położenia wymagany jest odbiornik GPS, połączony cyfrowo z mikrokontrolerem, z błędem pomiarowym maksymalnie do 0,5 m. Częstotliwość pomiaru przykładowego modułu GPS musiałaby wynosić powyżej 1,4 Hz, by nie opóźniać pozostałych pomiarów.

Podziękowania

Artykuł powstał na podstawie referatu wygłoszonego na 64. Barbórkowej Konferencji Studentckich Kół Naukowych AGH, gdzie zajął II miejsce w sekcji informatycznej. Chciałbym serdecznie podziękować całemu zespołowi HYDRIVE 1 i opiekunowi naszego koła, panu dr. hab. inż. Wojciechowi Horakowi, prof. AGH, który zawsze udzielał nam wielu cennych rad. Chcę podziękować mojej rodzinie, szczególnie moim rodzicom, którzy wspierali mnie na każdym etapie życia. Dziękuję również Kajetanowi Kupsiowi za pomoc przy zaprojektowaniu schematów do artykułu.

LITERATURA

- [1] Cuéllar S., Santos M., Alonso F., Fabregas E., Farias G., *Explainable anomaly detection in spacecraft telemetry*, Engineering Applications of Artificial Intelligence, vol. 133, 2024, 108083, <https://doi.org/10.1016/j.engappai.2024.108083>.
- [2] Cyr A.M., Anzenberg P., Nazeer H., Torosoff M., *Clinical variables affecting the diagnostic yield of continuous telemetry monitoring in detection of atrial fibrillation in cryptogenic embolic stroke*, The American Journal of Cardiology, vol. 206, 2023, s. 67–69, <https://doi.org/10.1016/j.amjcard.2023.08.071>.
- [3] Aitken J.P., O'Dor R.K., Jackson G.D., *The secret life of the giant Australian cuttlefish Sepia apama (Cephalopoda): Behaviour and energetics in nature revealed through radio acoustic positioning and telemetry (RAPT)*, Journal of Experimental Marine Biology and Ecology, vol. 320, 2005, s. 77–91, <https://doi.org/10.1016/j.jembe.2004.12.040>.
- [4] Bailey J., Harris E., Keedwell E., Djordjevic S., Kapelan Z., *The use of telemetry data for the identification of issues at combined sewer overflows*, Procedia Engineering, vol. 154, 2016, s. 1201–1208, <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.07.524>.
- [5] Cadence, *Formula 1: How F1 teams use telemetry, control, and analytics to go faster*, 21.10.2022, https://community.cadence.com/cadence_blogs_8/b/corporate/posts/formula-1-how-f1-teams-use-telemetry-control-analytics-to-go-faster [dostęp: 20.02.2024].
- [6] Horizon Educational, *H-500 XP Fuel Cell Stack*, <https://www.horizoneducational.com/h-500-xp-fuel-cell-stack/p1405> [dostęp: 23.02.2024].
- [7] Shell Eco-marathon, *About Shell Eco-marathon*, <https://www.shellecomarathon.com/about.html> [dostęp: 23.02.2024].
- [8] Opracowanie własne, *SKNK MechaniCAD*.
- [9] McLeod A.J., Böhre L.V., Bensmann B., Herrera O.E., Mérida W., *Anode and cathode overpotentials under accelerated stress testing of a PEM electrolysis cell*, Journal of Power Sources, vol. 589, 2024, 233750, <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2023.233750>.
- [10] Omran A., Lucchesi A., Smith D., Alaswad A., Amiri A., Wilberforce T., Sodré J.R., Olabi A.G., *Mathematical model of a proton-exchange membrane (PEM) fuel cell*, International Journal of Thermofluids, vol. 11, 2021, 100110, <https://doi.org/10.1016/j.ijft.2021.100110>.
- [11] Marino C.A., Chinelato F., Marufuzzaman M., *AWS IoT analytics platform for micro-grid operation management*, Computers and Industrial Engineering, vol. 170, 2022, 108331, <https://doi.org/10.1016/j.cie.2022.108331>.
- [12] Longo E., Redondi A.E.C., *Design and implementation of an advanced MQTT broker for distributed pub/sub scenarios*, Computer Networks, vol. 224, 2023, 109601, <https://doi.org/10.1016/j.comnet.2023.109601>.
- [13] Kegenbekov Z., Saparova A., *Using the MQTT protocol to transmit vehicle telemetry data*, Transportation Research Procedia, vol. 61, 2022, s. 410–417, <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2022.01.067>.

Jakub Świerczek*

ANALIZA FUNDAMENTU I KORPUSU ELEKTROWNI WIATROWEJ

W pracy przeprowadzono analizę fundamentu i korpusu elektrowni wiatrowej w programie Hexagon.Marc/Mentat. Utworzono przestrzenny model MES żelbetowej płyty fundamentowej opartej na podłożu oraz stalowy korpus składający się z płaszcza oraz wręg obwodowych i podłużnych. Żelbet tworzy spójna siatka 8-węzłowych elementów przestrzennych, korpus jest zbudowany z 4-węzłowych elementów powłokowych płaszcza oraz wręg podłużnych i poprzecznych. Generator oraz łopaty wirnika turbiny wiatrowej zostały zastąpione masami skupionymi w środkach ciężkości tych elementów oraz odpowiednimi masowymi momentami bezwładności. Parcie wiatru zostało przedstawione w postaci sił i ciśnień. Dokonano analizy tych wielkości w zakresie maksymalnej eksploatacyjnej prędkości wiatru. Celem pracy było utworzenie modelu numerycznego fundamentu i korpusu elektrowni wiatrowej, w którym wzorzowano się na elektrowni Lagerwey LW58 o mocy 750 kW. W obliczeniach wyznaczono przemieszczenia spowodowane statycznymi obciążeniami, częstością drgań własnych oraz prędkością drgań fundamentu i korpusu w wybranym zakresie częstotliwości sił wymuszających.

ANALYSIS OF THE FOUNDATION AND STEEL STRUCTURE OF A WIND POWER PLANT

In this paper, the foundation and body of a wind turbine were analyzed using Hexagon. Marc/Mentat software. A spatial FEM model of a reinforced concrete foundation slab supported on the ground and a steel body consisting of shell, perimeter and longitudinal frames was created. The reinforced concrete is formed by a coherent mesh of 8-node spatial elements, the body is formed by 4-node shell elements of the shell, longitudinal and transverse frames. The generator and rotor blades of the wind turbine were replaced by masses centered at the centers of gravity of these elements and the corresponding mass moments of inertia. Wind pressure was represented in terms of forces and pressures. An analysis of these quantities in terms of maximum operational wind speed was carried out. The purpose of the study was to create a numerical model of the foundation and body of a wind turbine, where the 750 kW Lagerwey LW58 power plant was modeled. In the calculations, the displacements from static loads, natural frequencies and vibration velocities of the foundation and body in the selected frequency range of forcing forces were determined.

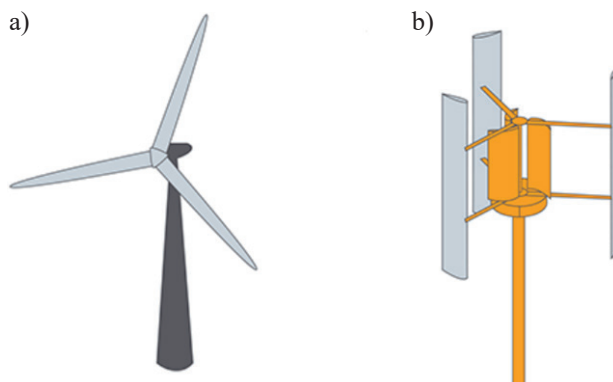
* AGH Akademia Górniczo-Hutnicza, Wydział Inżynierii Łądowej i Gospodarki Zasobami, Katedra Geomechaniki, Budownictwa i Geotechniki, Koło Naukowe Mechaniki Konstrukcji „Aksjator”.

1. WSTĘP

Elektrownie wiatrowe stanowią jedno z najbardziej dynamicznie rozwijających się źródeł energii odnawialnej na świecie. Ich rosnąca popularność wynika z wielu czynników, w tym zmian klimatycznych, zwiększonego zanieczyszczenia środowiska, dążenia do niezależności energetycznej oraz postępu technologicznego. Elektrownie wiatrowe wykorzystują energię kinetyczną wiatru do wytwarzania elektryczności za pomocą obracających się łopatek turbiny. Ta energia jest odnawialna i nie emituje szkodliwych gazów cieplarnianych ani zanieczyszczeń (na etapie wytwarzania energii elektrycznej), co sprawia, że elektrownie wiatrowe są atrakcyjnym alternatywnym rozwiązaniem wobec tradycyjnych źródeł energii takich jak paliwa kopalne. W ostatnich latach rozwój technologii wiatrowych doprowadził do znacznego wzrostu wydajności i konkurencyjności cenowej elektrowni wiatrowych, co przyczyniło się do ich coraz szerszego zastosowania na całym świecie. Dodatkową zaletą elektrowni wiatrowych jest także ich zdolność do produkcji energii w sposób zdecentralizowany, co może przyczynić się do zwiększenia stabilności sieci energetycznej oraz redukcji zależności od tradycyjnych źródeł energii. Wprowadzenie elektrowni wiatrowych stanowi więc istotny krok w kierunku zrównoważonej, czystej i niezależnej energetyki.

2. KRYTERIA PODZIAŁÓW ELEKTROWNI WIATROWYCH

Rozwiązania konstrukcyjne EW można podzielić według kilku podstawowych kryteriów [1]. Jednym z nich jest ustawienie osi obrotu wirnika. Występują elektrownie o poziomej i pionowej osi obrotu (rys. 1), jednak zdecydowanie przeważa ten pierwszy typ. Wynika to z faktu, że konstrukcje o pionowej osi obrotu wykazują się małą wydajnością energetyczną. Zaletą EW o pionowej osi obrotu jest niewrażliwość na zmiany kierunku wiatru. Wszystkie kierunki wiatru są jednakowo uprzywilejowane i nie ma potrzeby ustawiania wirnika pod wiatr oraz stosowania mechanizmów, które takie ustawianie by umożliwiały.



Rys. 1. Elektrownia wiatrowa o poziomej (a) i pionowej (b) osi obrotu

Źródło: [2]

Elektrownie o poziomej osi obrotu są bardziej wydajne, ale jednocześnie wymagają zastosowania bardziej złożonej technologii. Wysoką wydajność zawdzięczają mechanizmom odpowiednio pozycjonującym wirnik względem kierunku wiania wiatru. Kolejnym systemem, który wspiera funkcjonowanie tych EW, jest mechanizm zmiany geometrii łopat wirnika. System ten umożliwia takie ustawienie łopat, aby w danych warunkach wiatrowych praca turbiny była optymalna. Pozwala również w kryzysowych sytuacjach przy wysokich prędkościach wiatru wyłączyć EW dzięki ustawieniu łopat w najbardziej opływowej pozycji, która jednocześnie nie wywołuje obrotu wirnika. Szereg zastosowanych rozwiązań pozwala elektrowniom o poziomej osi obrotu osiągać moc nawet kilku megawatów.

Kolejnym kryterium podziału jest wartość współczynnika szybkobieżności λ . Wyróżnia się EW: wolnobieżne o $\lambda \leq 1,5$, średnobieżne o $1,5 \leq \lambda \leq 3,5$ oraz szybkobieżne o $\lambda \geq 3,5$. Współczynnik szybkobieżności określony jest zależnością:

$$\lambda = \frac{\Omega \cdot R_z}{V}$$

gdzie:

Ω – prędkość kątowna koła wirnikowego, $\Omega = \pi \cdot n / 30$ [rad/s],

V – prędkość wiatru [m/s],

R_z – promień (zewnętrzny) koła wirnikowego [m],

n – prędkość obrotowa wirnika [obr/min].

EW klasyfikuje się również ze względu na moc generatora (Nn). Występują EW: małej mocy o $Nn \leq 50$ kW, średniej mocy o $50 \text{ kW} < Nn < 250$ kW, dużej mocy o $250 \text{ kW} \leq Nn < 750$ kW i bardzo dużej mocy o $Nn \geq 750$ kW.

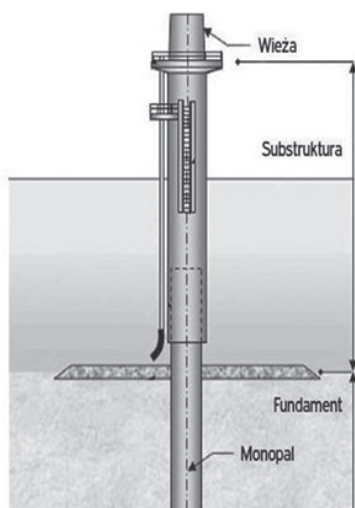
Można również podzielić EW ze względu na liczbę łopat wirnika – stosowane są wirniki z dwoma, trzema oraz czterema łopatom.

3. POSADOWIENIE ELEKTROWNI WIATROWYCH

Fundamenty pod elektrownie wiatrowe są kluczowymi strukturami, które umożliwiają stabilne umieszczenie turbin wiatrowych na lądzie oraz morzu. Ze względu na wysoce rozwiniętą technologię istnieje wiele rodzajów fundamentów. W związku z tym podczas projektowania posadowienia należy rozważyć, które rozwiązanie będzie najlepsze i zapewni bezpieczeństwo całej elektrowni wiatrowej.

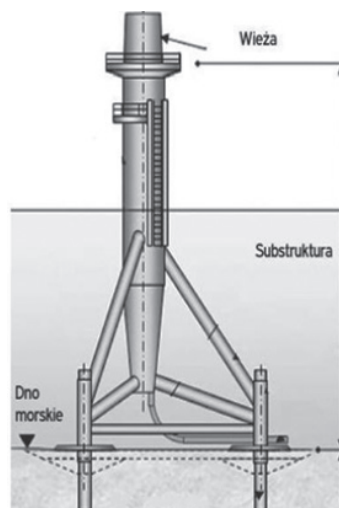
Wśród posadowień stosowanych na obszarach morskich można wyróżnić fundament monopalowy (rys. 2), który ma zazwyczaj cylindryczną konstrukcję osadzaną w dnie morskim za pomocą wbijanych lub wkręcanych pali. W podobny sposób przenosi obciążenia fundament trójnożny (rys. 3) przytwierdzony do dna morskiego za pomocą trzech pali i odpowiednio ukształtowanych ramion, które łączą się ze sobą u góry, tworząc platformę turbiny wiatrowej. Kolejnym przykładem jest fundament kratownicowy (rys. 4), który ze względu na swoją budowę zapewnia sztywność i niskie opory wody. Jest to konstrukcja sprawdzona i wykorzystywana również przy budowie platform do wydobywania ropy naftowej na obszarach

morskich. Na lądzie najpopularniejszym typem posadowienia elektrowni wiatrowych jest posadowienie bezpośrednie monolityczne żelbetowe (rys. 5). Rozwiązanie to pozwala na dobór parametrów geometrycznych i materiałowych w zależności od występujących warunków geotechnicznych oraz wielkości obiektu.



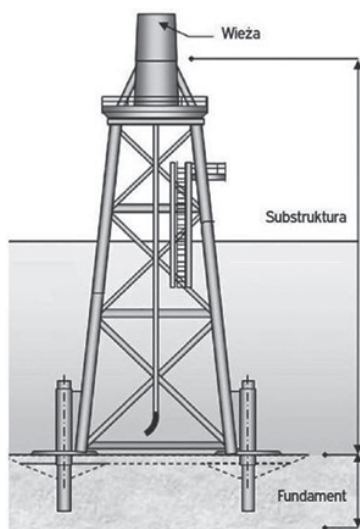
Rys. 2. Fundament monopalowy

Źródło: [3]



Rys. 3. Fundament trójnożny

Źródło: [3]



Rys. 4. Fundament kratownicowy

Źródło: [3]



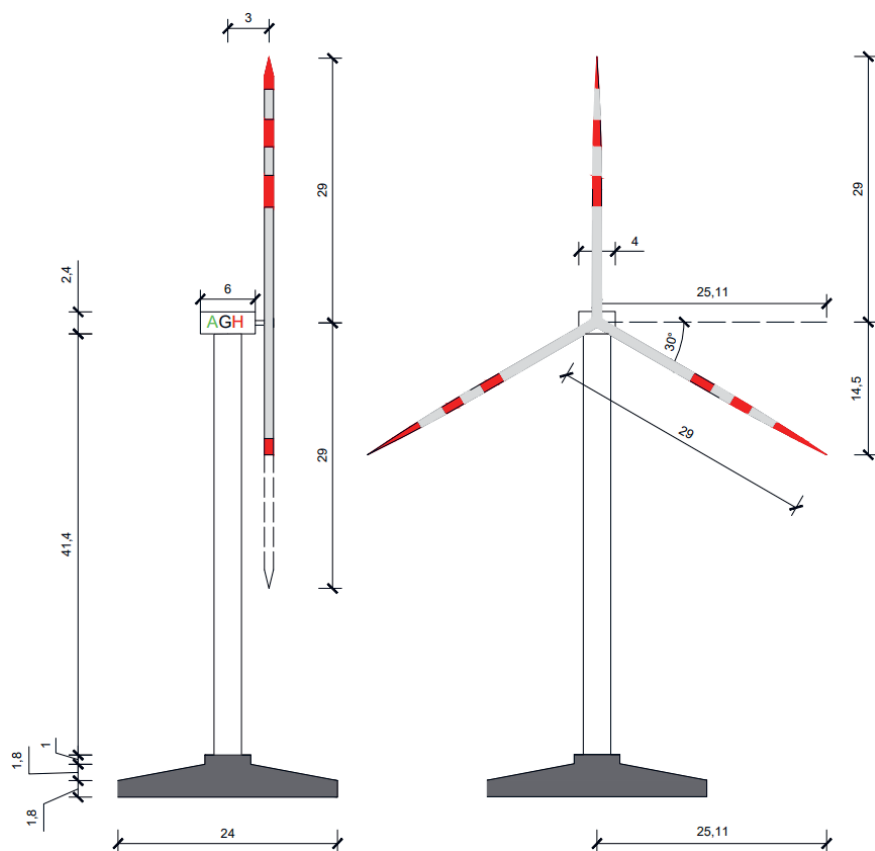
Rys. 5. Fundament bezpośredni monolityczny żelbetowy

Źródło: [4]

4. MODEL MES

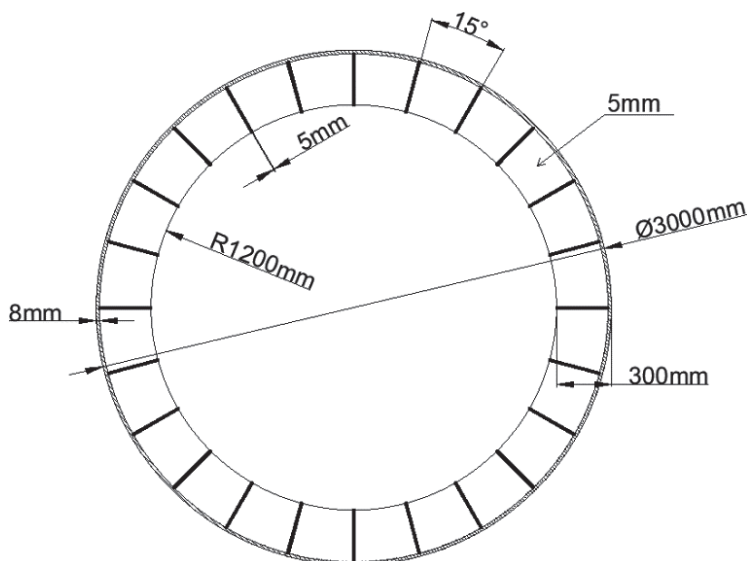
Celem analizy MES było utworzenie modelu numerycznego fundamentu i korpusu elektrowni wiatrowej. W obliczeniach wyznaczono przemieszczenia spowodowane statycznymi obciążeniami, częstotliwością drgań własnych oraz prędkością drgań fundamentu i korpusu w wybranym zakresie częstotliwości sił wymuszających.

Do analizy fundamentu i korpusu elektrowni wiatrowej wykorzystano program Hexagon. Marc/Mentat [5]. Analizowana w pracy EW wzorowana była na istniejącej konstrukcji o nazwie EW Lagerwey LW58. Jest to konstrukcja o poziomej osi obrotu i współczynniku szybkości $\lambda = 3,03$, który klasyfikuje ją do kategorii elektrowni średniobieżnych. Moc na poziomie 750 kW pozwala przypisać ją do grupy EW o bardzo dużej mocy. Wirnik składa się z trzech łopatek i wyposażony jest w mechanizm zmiennej geometrii. Jego średnica wynosi 58 m. Fundament u podstawy ma średnicę 24 m. Korpus ma średnicę 3 m i osiąga 46 m wysokości. Generator jest sześcianiem o wymiarach $2,4 \text{ m} \times 6 \text{ m} \times 4 \text{ m}$. Schematyczny model analizowanej EW został przedstawiony na rysunku 6.



Rys. 6. Schematyczny model analizowanej EW

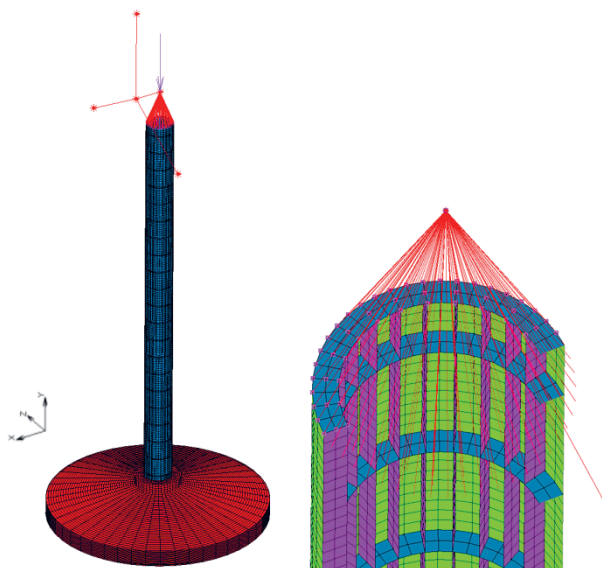
Utworzono przestrzenny model MES płyty fundamentowej opartej swobodnie całą swoją powierzchnią na podłożu oraz stalowy korpus składający się z płaszcza, wręgi obwodowej oraz wręgi podłużnej. Płytę fundamentową tworzy spójna siatka 8-węzłowych elementów przestrzennych typu HEX8 współpracująca z korpusem. Korpus składający się z płaszcza oraz wręg obwodowych i wręg podłużnych jest sztywno połączony z fundamentem. Powłoki tworzą 4-węzłowe elementy powłokowe typu QUAD4 (rys. 7). Przyjęto następujące parametry materiałowe żelbetowej płyty fundamentowej: gęstość objętościową równą 2500 kg/m^3 , moduł sprężystości podłużnej (moduł Younga) wynoszący 34 GPa i współczynnik odkształcenia poprzecznego (współczynnik Poissona) o wartości $0,2$. W odniesieniu do płaszcza oraz wręgi obwodowej i podłużnej zostały zadane parametry charakterystyczne dla stali i przyjęto gęstość objętościową równą 7850 kg/m^3 , moduł Younga równy 210 GPa oraz współczynnik Poissona wynoszący $0,3$. Przyjęto grubości wręgi obwodowej i wręgi podłużnej 5 mm , a grubość płaszcza stalowego 8 mm (rys. 7).



Rys. 7. Przekrój korpusu stalowego analizowanej EW

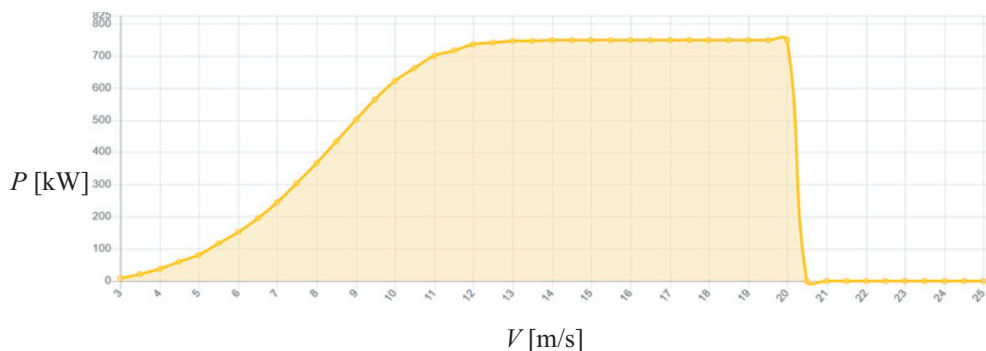
Generator został zastąpiony masą skupioną $M_G = 56 \text{ t}$ umieszczoną w środku ciężkości, przy czym założono, że jego połączenie z płaszczem jest sztywne – zrealizowano to za pomocą elementów RBE2 [6] (rys. 8). Dodatkowo w celu opisu przestrzennych własności bezwładnościowych generatora wyliczono diagonalny tensor bezwładności (osie główne centralne) $T_G = \text{diag}(101,55; 242,67; 194,88) \text{ t}\cdot\text{m}^2$; przyjęto założenie, że masa jest równomiernie rozłożona w prostopadłościanie o wymiarach $2,4 \text{ m} \times 6 \text{ m} \times 4 \text{ m}$ (rys. 6).

Masy łopat zamodelowano w ich środkach ciężkości (rys. 8). Każda łopata ma masę $4,6 \text{ t}$. Masowe momenty bezwładności wyrażono w osiach głównych centralnych; w przypadku każdej łopaty tensor ten ma wartości $T_L = \text{diag}(0,368; 428,55; 428,55) \text{ t}\cdot\text{m}^2$.



Rys. 8. Zamocowanie mas generatora i mas łopat wirnika.
Czerwony kolor oznacza sztywne elementy RBE2

Parcie wiatru na łopaty wirnika zostało przedstawione w postaci siły skupionej skierowanej poziomo ze zwrotem w stronę płaszcza w środku ciężkości każdej z łopat¹. Analizowany model ma zmienną geometrię łopat wirnika i w zakresie prędkości od 12 m/s do 21 m/s utrzymuje stałą moc generowanego prądu (rys. 9).



Rys. 9. Funkcja mocy od prędkości wiatru dla analizowanego generatora

Źródło: [7]

¹ Jest to w istocie przybliżenie. Wypadkowa statycznie ekwiwalentnego parcia wiatru powinna być przyłożona w środku parcia łopaty. Takie uproszczenie jest usprawiedliwione tym, że nie przeprowadza się tu analizy statycznej łopat.

Ostatecznie przyjęto w analizie, że maksymalna prędkość eksploatacyjna wynosi właśnie $V_{\max} = 21$ m/s. Siła działająca na łopatę wirnika została obliczona ze wzoru [8]:

$$P_L = \beta \cdot C_x \cdot \frac{\rho V_{\max}^2}{2} \cdot l \cdot L$$

W obliczeniach przyjęto: bezwymiarowy współczynnik oporu opływu $C_x = 1,26$, gęstość powietrza $\rho = 1,25$ kg/m³, prędkość wiatru $V_{\max} = 21$ m/s, cięciwę profilu $l = 0,8$ m, efektywną długość łopaty $L = 26$ m oraz współczynnik dynamiczny $\beta = 1,5$. Po podstawieniu tych wartości do wzoru otrzymano $P_L = 10,34$ kN.

Wiatr jest obciążeniem oddziałującym również na stalowy korpus EW w postaci ciśnienia. W celu wyznaczenia obwodowej zmienności pola ciśnień najpierw obliczono wartość bazową ciśnienia prędkości wiatru (q_b) [9]:

$$q_b = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V_{\max}^2 = \frac{1}{2} \cdot 1,25 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 21^2 \frac{\text{m}}{\text{s}} = 0,28 \text{ kPa}$$

Następnie obliczono współczynnik ekspozycji $C_e(z)$ [9] dla I kategorii terenu, do której należą jeziora lub tereny płaskie, poziome, o nieznacznej roślinności i bez przeszkód terenowych, ponieważ w dużej mierze na takich terenach występuje największa liczba elektrowni wiatrowych. Wysokość odniesienia przyjęto $z = 46$ m.

$$C_e(46) = 2,8 \cdot \left(\frac{46}{10} \right)^{0,19} = 3,74$$

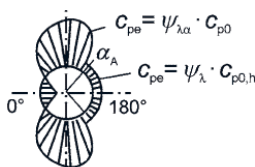
Następnie obliczono wartość szczytową ciśnienia prędkości wiatru $q_p(z)$:

$$q_p(46) = C_e(46) \cdot q_b = 3,74 \cdot 0,28 \text{ kPa} = 1,04 \text{ kPa}$$

Ciśnienie wiatru działające na powierzchnię korpusu wyznaczono z wyrażenia:

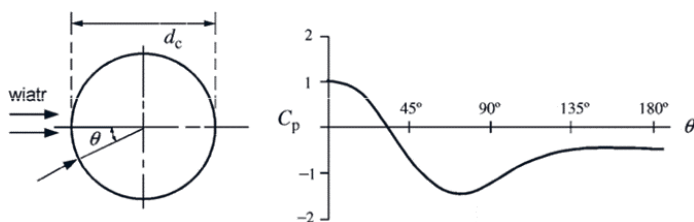
$$w_e(\theta) = \beta \cdot q_p(46) \cdot C_p(\theta)$$

W tym wzorze kluczową pozostaje funkcja $C_p(\theta)$ odwzorowująca pole oddziaływań wiatru na korpus EW (rys. 10) – jest ona określona w normie [9] w zależności od współrzędnej obwodowej θ z punktem początkowym na ścianie nawietrznej (rys. 11).



Rys. 10. Pole oddziaływań wiatru na korpus EW

Źródło: [9]



Rys. 11. Zmienność ciśnienia wiatru wokół połowy obwodu silosu pojedynczego

Źródło: [10]

Obwodowa zmienność ciśnienia (o wartości dodatniej, gdy skierowane do wewnątrz) jest określona zależnością:

$$C_p(\theta) = -0,53 + 0,283 \cdot \cos\theta + 1,03 \cdot \cos 2\theta + 0,36 \cdot \cos 3\theta - 0,14 \cdot \cos 4\theta$$

w której współczynniki wynikają z geometrii płaszcza.

W pracy analizowano dodatkowo drgania wywołane ustalonymi obrotami wirnika. Wiąże się to z wprowadzeniem sił harmoniczných wynikających z obrotów niewyważonych części ruchomych wirnika oraz generatora, które wpływają na dynamikę konstrukcji. W wyniku obrotu wirnika z prędkością obrotową Ω na nie zrównoważoną masę m_w działa siła bezwładności:

$$F_o = m_w \cdot e \cdot \Omega^2$$

Promień niewyważenia mas wirujących oszacowano na $e = 2,5$ mm, wielkość mas wirujących $m_w = 36,6$ t, zaś $\Omega = \pi n/30$ analizowano w przedziale obrotów $n = [2; 20]$. Powyższa zależność określa siły prostopadłe do osi wału. Natomiast składnik siły wzdłuż osi oszacowano na $F_x = 0,2F_o$.

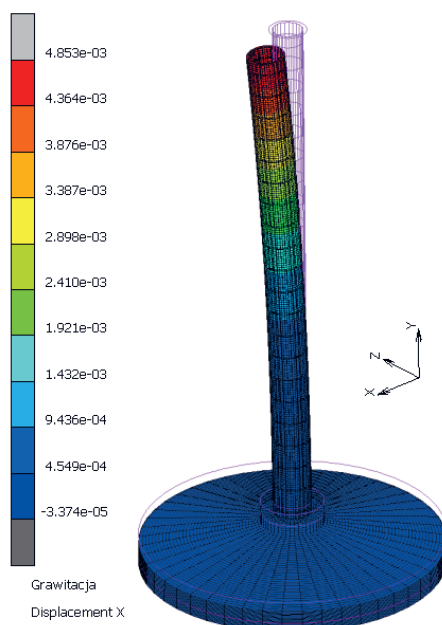
Kinematyczne warunki brzegowe związane są z podparciem sprężystym fundamentu – zastosowano sprężyste podparcie powierzchniowe wynikające z własności gruntu $k_g = 40$ MPa/m [11].

5. WYNIKI ANALIZY

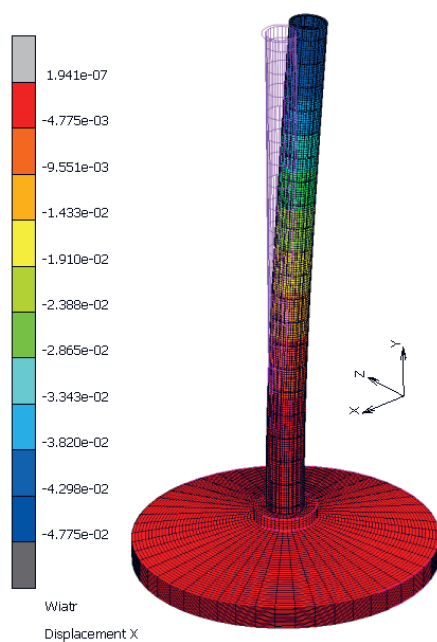
Pierwszym zadaniem było obliczenie oddziaływań statycznych. Na rysunku 12 pokazano przemieszczenia wywołane ciężarem własnym konstrukcji; maksymalne wychylenie trzonu EW wynosi 4,9 mm w stronę wirnika, który zgina trzon.

Obliczono również przemieszczenia spowodowane działaniem wiatru (rys. 13). Maksymalne przemieszczenia wynoszą $D_x = 48$ mm w kierunku wiatru. Jak zaznaczono, wiatr oddziałuje na wirnik oraz trzon EW (rys. 14).

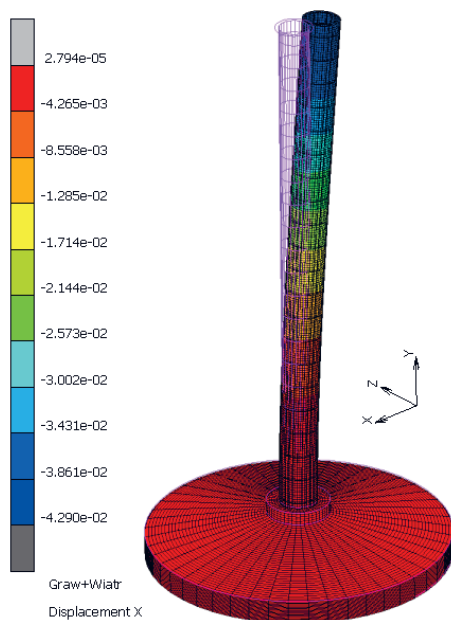
Przemieszczenia nie przekraczają wartości dopuszczalnych $u_{dop} = 160$ mm [12].



Rys. 12. Przeszyczenia $D_x = 4,9$ mm wywołane działaniem ciężaru własnego

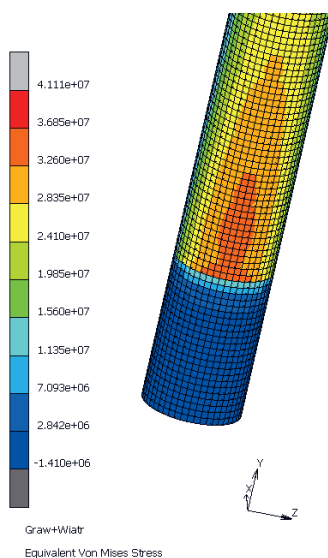


Rys. 13. Przeszyczenia $D_x = 48$ mm spowodowane parciem wiatru



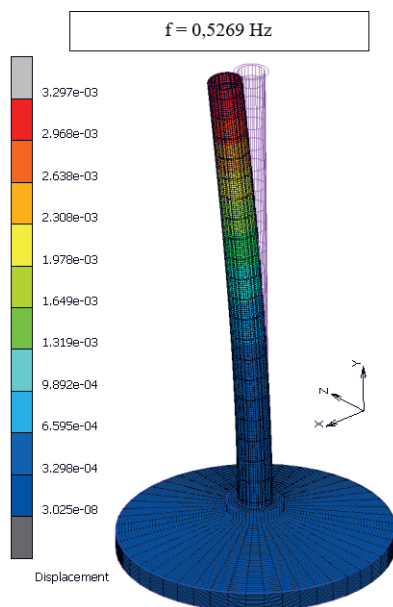
Rys. 14. Przeszyczenia $D_x = 43$ mm spowodowane parciem wiatru i działaniem ciężaru własnego

Na rysunku 15 pokazano maksymalne naprężenia zredukowane HMH – w powłoce trzonu wynoszą one $\sigma_{\text{HMH}} = 41$ MPa.

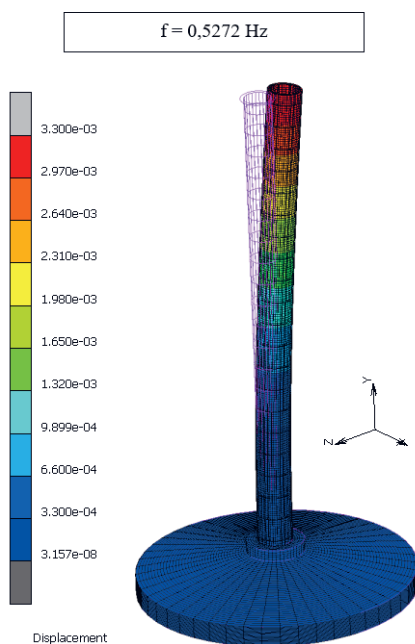


Rys. 15. Maksymalne naprężenia HMH spowodowane parciem wiatru i działaniem ciężaru własnego $\sigma_{\text{HMH}} = 41$ MPa

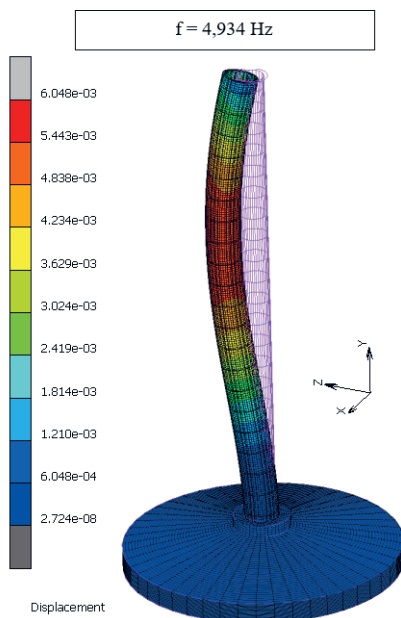
Następnym krokiem było wyznaczenie częstotliwości drgań własnych konstrukcji. Na kolejnych rysunkach (rys. 16–21) pokazano postacie drgań i odpowiadające im częstotliwości.



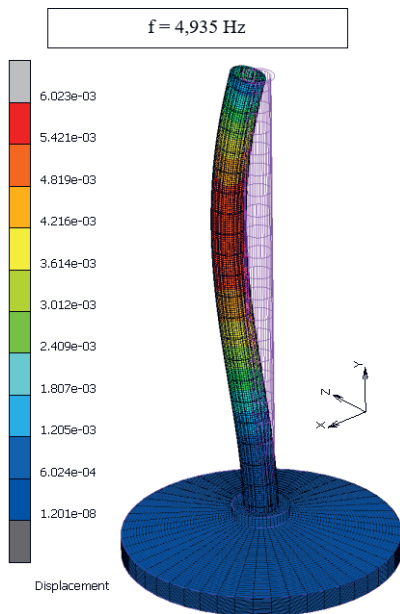
Rys. 16. Pierwsza postać drgań własnych $f_1 = 0,53 \text{ Hz}$



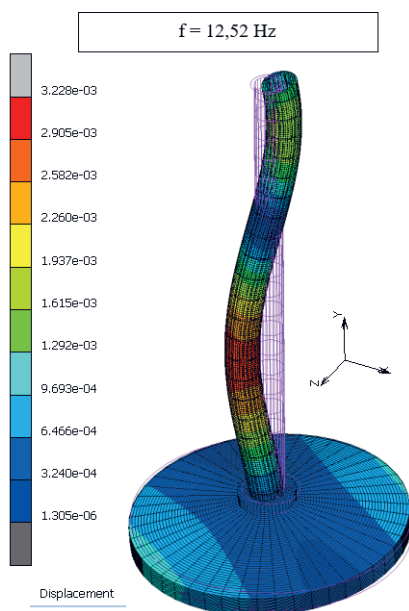
Rys. 17. Druga postać drgań własnych $f_2 = 0,53 \text{ Hz}$



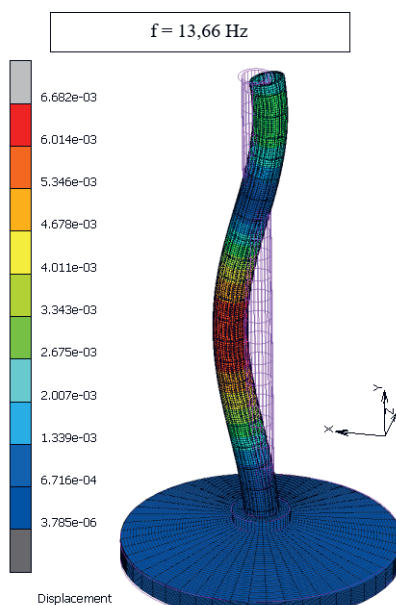
Rys. 18. Trzecia postać drgań własnych $f_3 = 4,934 \text{ Hz}$



Rys. 19. Czwarta postać drgań własnych $f_4 = 4,935 \text{ Hz}$



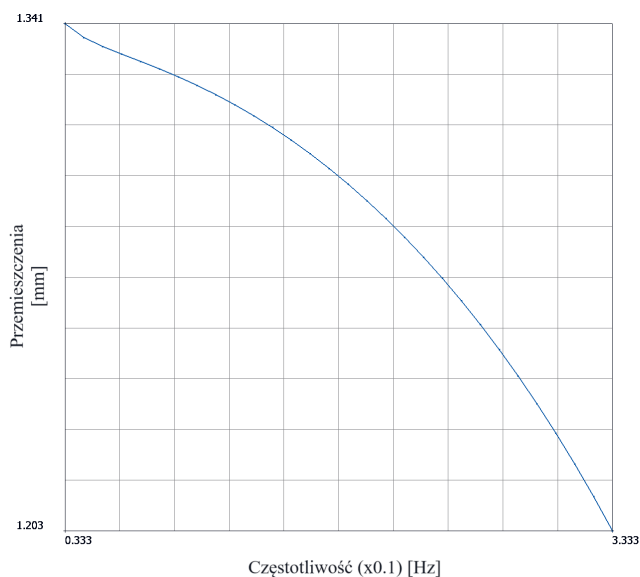
Rys. 20. Piąta postać drgań własnych $f_5 = 12,52 \text{ Hz}$



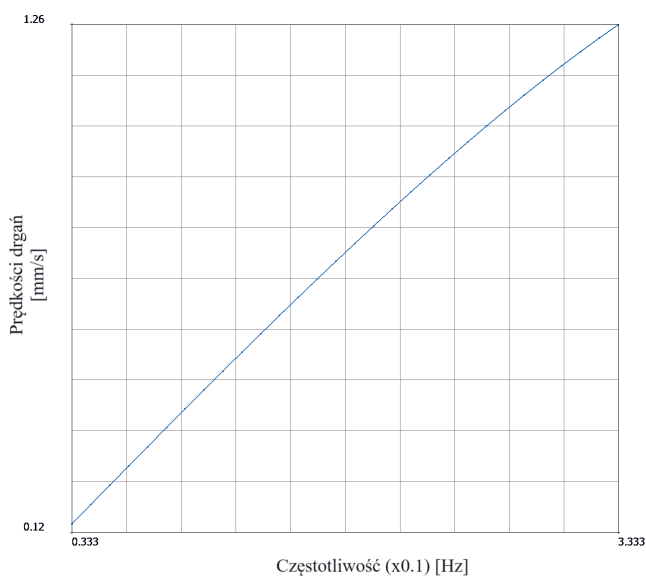
Rys. 21. Szósta postać drgań własnych $f_6 = 13,66 \text{ Hz}$

Wszystkie częstotliwości drgań własnych leżą poza zakresem drgań generowanych obrotami wirnika, który wynosi $f \in [0,03; 0,33] \text{ Hz}$ [13].

Kolejnym krokiem było wyliczenie amplitud przemieszczeń i prędkości w eksploatacyjnym zakresie częstotliwości obrotów. Na rysunku 22 pokazano amplitudy przemieszczeń środka masy generatora, a na rysunku 23 – jego amplitudy prędkości drgań. Obie zmienne są uzależnione od częstotliwości obrotów generatora.



Rys. 22. Amplitudy przemieszczeń środka masy generatora w funkcji częstotliwości obrotów



Rys. 23. Amplitudy prędkości środka masy generatora w funkcji częstotliwości obrotów

6. PODSUMOWANIE

W artykule przedstawiono wyniki obliczeń wykonanych na modelu MES elektrowni wiatrowej utworzony w programie Hexagon.Marc/Mentat. Zastosowanie odpowiednich warunków brzegowych, przypadków obciążenia i ich wartości oraz zdefiniowanie własności materiałowych stali i betonu pozwoliło uzyskać cyfrowy model konstrukcji elektrowni wiatrowej. Do obliczenia sił spowodowanych parciem wiatru działających na model użyto wzorów normowych. Model MES został przeanalizowany pod kątem przemieszczeń powstałych w wyniku oddziaływania sił grawitacji oraz wiatru. Z wyników można odczytać, że na skutek oddziaływania wyłącznie siły ciężkości generator wychyla się w kierunku wirnika. Jednak po przyłożeniu sił wywołanych parciem wiatru środek masy przemieszcza się w kierunku przeciwnym. Przemieszczenia nie przekraczają dopuszczalnych wartości normowych.

Konstrukcja została również przeanalizowana pod kątem dynamicznym. Wyznaczono częstotliwości drgań własnych oraz sprawdzono, jak siły wymuszenia spowodowane niewyważeniem generatora będą oddziaływać na konstrukcję. Po analizie ustalono, że nie ma ryzyka wystąpienia rezonansu, ponieważ częstotliwości pracy generatora są znacząco różne od częstotliwości drgań własnych EW. Również wykresy amplitud przemieszczeń i prędkości drgań środka masy generatora pokazują znikome wartości.

W związku z prężnie rozwijającą się energetyką niekonwencjonalną i rosnącym znaczeniem elektrowni wiatrowych tworzenie modeli MES tych obiektów jest koniecznym i niezwykle użytecznym narzędziem inżyniera.

LITERATURA

- [1] Matachowski F., Martynowicz P., *Analiza dynamiki konstrukcji elektrowni wiatrowej z wykorzystaniem środowiska COMSOL Multiphysics*, Modelowanie Inżynierskie, t. 13, nr 44, 2012, s. 209–215.
- [2] Firląg S., *Energia wiatru*, [w:] *Poradnik inwestora: Buduję z głową, buduję energooszczędnie*, Fundacja „Ziemia i Ludzie”, Warszawa 2014, s. 111, <http://mieszkaj-energooszczednie.pl/poradnik-inwestora/ograniczenie-zuzycia-energii-elektrycznej/161-14-4-eenergia-wiatru> [dostęp: 25.03.2024].
- [3] Instsani – Vademecum dla uczniów technikum, *Montaż elektrowni wiatrowych morskich: Przegląd konstrukcji farm offshore*, <https://instsani.pl/technik-urzadzen-i-systemow-energetyki-odnawialnej/vademecum-energetyki-odnawialnej/energia-wiatru/montaz-elektrowni-wiatrowych-morskich/przeglad-konstrukcji-farm-offshore/> [dostęp: 25.03.2024].
- [4] Zelbet.com, *Fundamenty pod elektrownie wiatrowe*, https://zelbet.com.pl/oferta/fundamenty-pod-elektrownie-wiatrowe/?fbclid=IwAR2lwoF6eJ_A8vWPyr9SceONJOYN-0fM8__PLBNH1LLvjGjeW32MRhJZACdE [dostęp: 25.03.2024].
- [5] *Marc 2020 feature Pack 1. Volume A: Theory and User Information*, MSC Software.
- [6] Kruszewski J., Sawiak S., Wittbrodt E., *Metoda sztywnych elementów skończonych w dynamice konstrukcji*, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa 1999.

- [7] Wind-turbine-models.com, *Lagerwey LW 58/750*, <https://pl.wind-turbine-models.com/turbines/1349-lagerwey-lw-58-750> [dostęp: 25.03.2024].
- [8] Gumuła S., Knap T., Strzelczyk P., Szczerba Z., *Energetyka wiatrowa*, wyd. 3 zm., Wydawnictwa AGH, Kraków 2023.
- [9] PN-EN 1991-1-4:2008, *Eurokod 1: Oddziaływania na konstrukcje – Część 1–4: Oddziaływania ogólne, Oddziaływania wiatru*, Polski Komitet Normalizacyjny, Warszawa 2008.
- [10] PN-EN 1993-4-1:2009, *Eurokod 3: Projektowanie konstrukcji stalowych – Część 4–1: Silosy*, Polski Komitet Normalizacyjny, Warszawa 2009.
- [11] PN-B-03040:1980, *Fundamenty i konstrukcje wsporcze pod maszyny*, Polski Komitet Normalizacyjny, Warszawa 1980.
- [12] PN-EN 1993-1-1:2006, *Eurokod 3: Projektowanie konstrukcji stalowych – Część 1–1: Reguły ogólne i reguły dla budynków*, Polski Komitet Normalizacyjny, Warszawa 2006.
- [13] Nizioł J.: *Metodyka rozwiązywania zadań z mechaniki*, Wydawnictwo WNT, Warszawa 2017.

Sebastian Taraszkiewicz*, Emilia Bentkowska*, Tomasz Mitro*

BADANIE OSUWISKA „STOK POD BARANEM” W REJONIE WIELICZKI ZA POMOCĄ METODY ERT

Praca przedstawia rezultaty badań metodą tomografii elektrooporowej (ERT) przeprowadzonych na obszarze osuwiska nr 823 w parku „Stok pod Baranem” w Wieliczce. Celem było rozpoznanie wewnętrznej struktury osuwiska i określenie ryzyka wystąpienia ruchów masowych. Obszar badań zbudowany jest z fliszu, iłów i glin polodowcowych. Badania wykonano wzdłuż dwóch profili geoelektrycznych: W-1 i W-2. Uzyskane dane pomiarowe poddano procedurze inwersji i zaawansowanej filtracji. Wynikiem przetwarzania były przekroje oporności wyinterpretowanej. Dodatkowo obliczono gradienty zmian oporności wyinterpretowanej. Wyniki interpretacji geofizycznej ERT i dostępne informacje otworowe pozwoliły na stworzenie przekroi litologicznych. Finalnie zbudowano dwuwymiarowy model geologiczny analizowanego obszaru. Pozwolił on na wyznaczenie charakterystycznych struktur osuwiskowych. Określono również granice litologiczne glina-ił oraz ił-podłoże fliszowe. Wskazano ponadto przypuszczalne płaszczyzny poślizgu.

INVESTIGATION OF THE LANDSLIDE “STOK POD BARANEM” IN THE WIELICZKA AREA BY USING ERT METHOD

This paper shows results of electrical resistivity tomography (ERT) research carried out in the area of landslide no. 823 in the “Stok pod Baranem” park in Wieliczka. The measurements were aimed at identifying the internal structure of the landslide and determining the risk of mass movements. The research area is built on flysch, clays and glacial loams. ERT surveys were conducted alongside two geoelectric profiles: W-1 and W-2. The obtained measurement data underwent inversion and advanced filtration. As a result of the processing, an inverse model resistivity section was obtained. Additionally, the gradients of changes in the interpreted resistivity were calculated. The results of ERT geophysical interpretation and available borehole information allowed the creation of lithological cross-sections. Finally, a two-dimensional geological model of the analyzed area was built. It allowed to determine characteristic landslide structures. Lithological boundaries of clay-silt and silt-flysch basement were also defined. In addition, a presumed slip planes were determined.

* AGH Akademia Górniczo-Hutnicza, Wydział Geologii, Geofizyki i Ochrony Środowiska, Koło Naukowe Geofizyków AGH „Geofon”.

1. WSTĘP

Osuwiska stanowią jedno z najczęstszych i najpoważniejszych w skutkach geozagrożeń. Jest to rodzaj ruchów masowych polegających na przemieszczaniu się mas skalnych lub materiału zwietrzelinowego wzdłuż powierzchni poślizgu pod wpływem siły ciężkości [1]. Głównymi czynnikami sprzyjającymi powstawaniu osuwisk są określona budowa geologiczna, intensywne i długotrwałe opady atmosferyczne oraz działalność człowieka. Ruchy masowe w Polsce występują w strefie brzegowej Bałtyku oraz na stokach dolin rzek nizinnych, jednak ich największa koncentracja jest obserwowana na obszarze Karpat [2]. Obecnie szacuje się, że 95% wszystkich osuwisk w Polsce zlokalizowane jest w Karpatach fliszowych, a około 10% terenu Karpat było lub jest zagrożone osuwaniem lub innymi ruchami masowymi [3].

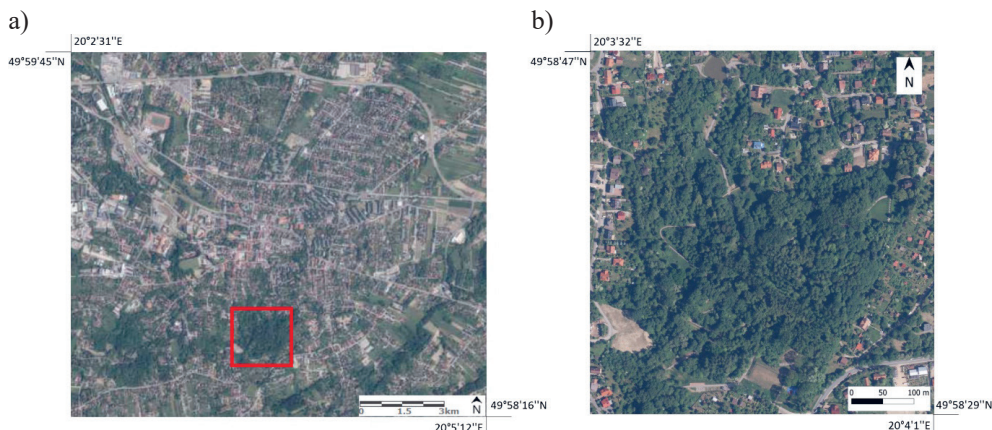
Postępujący rozwój obszarów miejskich zmusza do zagospodarowania terenów zagrożonych ruchami masowymi. W związku z tym kluczowe jest skrupulatne rozpoznanie budowy geologicznej w celu uniknięcia poważnych szkód społeczno-ekonomicznych. Zabudowa mieszkalna, ciągi komunikacyjne czy też obiekty użyteczności publicznej ulokowane na obszarach osuwisk aktywnych lub czasowo aktywnych wymagają stałego monitorowania oraz prac rozwojowo-badawczych dotyczących sposobów zabezpieczeń [4].

W pracy przedstawiono wyniki badań ERT obszaru parku miejskiego „Stok pod Baranem” w Wieliczce. Pomiary przeprowadzono na dwóch profilach geoelektrycznych: W-1 i W-2. Park znajduje się na aktywnym osuwisku. Skutkiem tego jest powstawanie poważnych uszkodzeń infrastruktury parku. Przeprowadzone badania miały na celu rozpoznanie wewnętrznej struktury osuwiska. Wykorzystanie metod geofizycznych umożliwiła przestrzenny pomiar parametrów fizycznych związanych z charakterystyką litologiczną, hydrologiczną i geotechniczną obszarów objętych działaniem ruchów masowych [5]. Dodatkowo techniki geofizyczne cechują się nieinwazyjnością, szybkością pomiaru i relatywnie niskimi kosztami.

2. OBSZAR BADAŃ

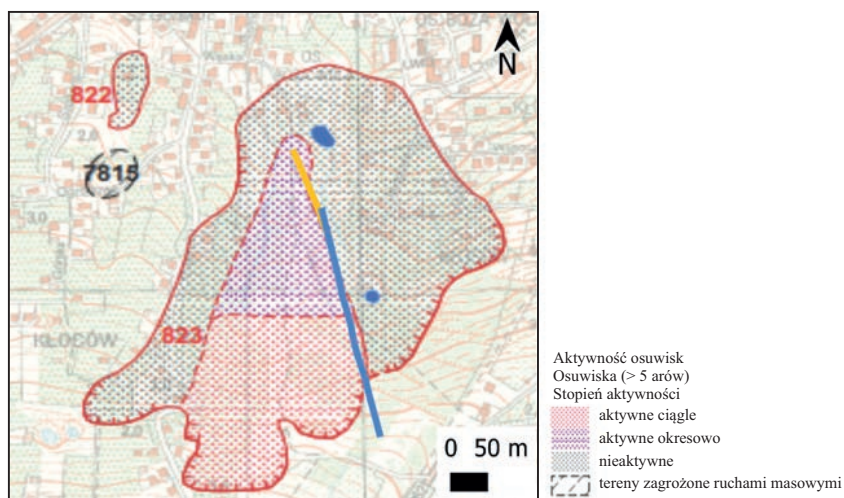
2.1. LOKALIZACJA

Badane osuwisko jest położone w południowej części Wieliczki (rys. 1a), na obszarze „Stoku pod Baranem”. Znajduje się na granicy Zewnętrznych Karpat Zachodnich i zapadliska przedkarpackiego. Analizowany obszar dość znacznie zmieniał się w ostatnim czasie. W 2020 roku utworzono na jego terenie park miejski z systemem szutrowych alejek i infrastrukturą (rys. 1b). Prowadzone badania zakładały rozpoznanie wewnętrznej struktury osuwiska w celu określenia stopnia ryzyka wystąpienia ruchów masowych. Było to o tyle ważne, że zaledwie rok po oddaniu inwestycji do użytku mieszkańców, w wyniku letnich ulew, infrastruktura parku uległa uszkodzeniu. Badane osuwisko zostało sklasyfikowane w Systemie Osłony Przeciwośuwiskowej (SOPO) pod numerem 823. Profil W-1 miał swój początek w strefie czasowo aktywnej. Dalej przebiegał on po granicy obszarów aktywnych i nieaktywnych osuwiska. Profil W-2 w większości poprowadzony został również po tej granicy. Jedyne jego końcowe 75 m znajdowało się poza zasięgiem osuwiska (rys. 2).



Rys. 1. Lokalizacja obszaru badań na mapie Wieliczki (a) oraz widok parku miejskiego „Stok pod Baranem” (b)

Źródło map podkładowych: [6]



Rys. 2. Mapa SOPO z naniesionym profilem W-1 (żółty) i W-2 (niebieski)

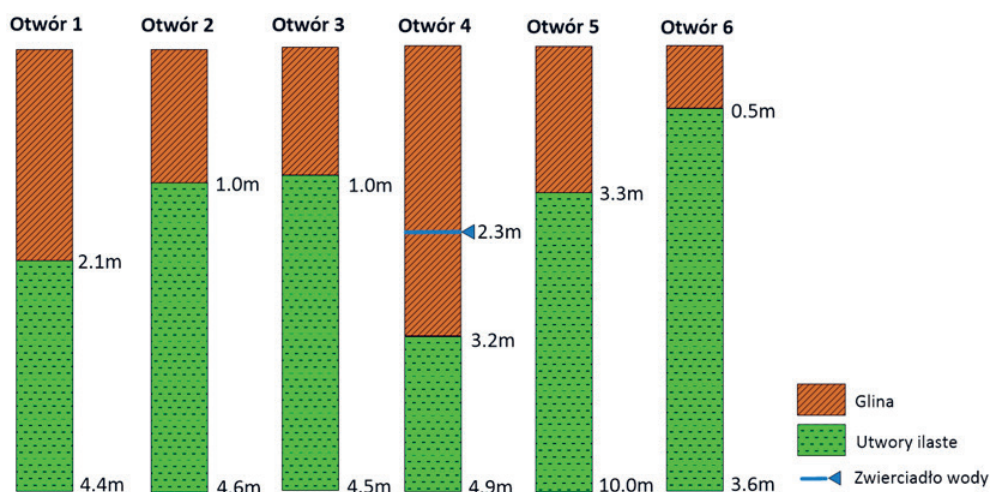
Źródło mapy podkładowej: [7]

2.2. BUDOWA GEOLOGICZNA

„Stok pod Baranem” to osuwisko skalno-zwietrzelinowe. Jego podłoże zbudowane jest z tektonicznie zaburzonych osadów fliszu karpackiego, reprezentowanych przez dolnokredowe łupki i piaskowce serii podśląskiej. Przeważającą część stoku stanowią łupki i łupki margliste. W wyniku procesów eolicznych i tektonicznych ich wierzchnie warstwy uległy przekształceniu w mieszaninę ilasto-łupkową z przewarstwieniami piaskowca w górnej części

profilu. Warstwę przypowierzchniową stanowią utwory czwartorzędowe (pyły, gliny pylaste, fluwiogłacjalne gliny i piaski) [8].

Na obszarze badań w 1989 roku wykonano otwory geotechniczne, które umożliwiły dokładniejsze rozpoznanie budowy geologicznej i dowiązanie wyników interpretacji geofizycznej (rys. 3). Pierwszą warstwę w każdym otworze stanowiły gliny, w obrębie których na głębokości ok. 2,3 m nawiercono zwierciadło wody podziemnej (otwór 4). Jego występowanie prowadzi do zawodnienia otaczających obszarów, a w rezultacie – zmniejszenia tarcia między utworami czwartorzędowymi i podległymi. Drugą warstwą są utwory ilaste. Żadnym z dostępnych otworów nie nawiercono podłoża fliszowego.



Rys. 3. Uproszczona wizualizacja danych geologicznych z otworów znajdujących się w pobliżu profilu pomiarowych (otwory nie są zaprezentowane w skali)

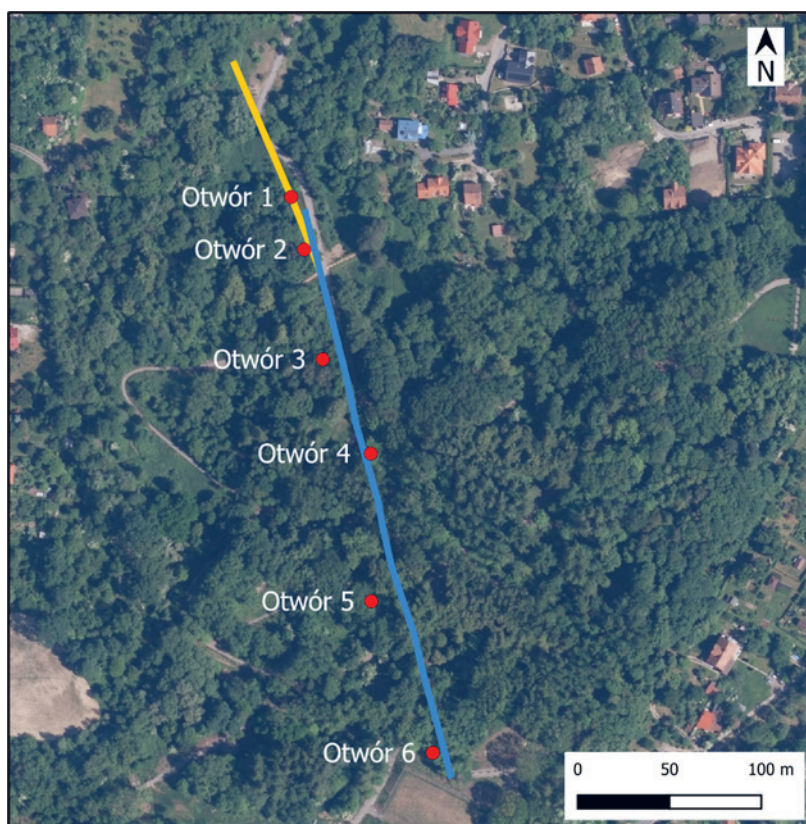
Źródło: opracowanie własne na podstawie [7]

3. METODYKA BADAŃ

Tomografia elektrooporowa (ERT – *electrical resistivity tomography*) jest jedną z najczęściej wykorzystywanych metod geofizycznych w rozpoznaniu przypowierzchniowej budowy geologicznej, szczególnie w określeniu horyzontalnej zmienności litologicznej [9]. Metoda jest również szeroko stosowana w badaniu osuwisk [10]. Służy ona wyznaczeniu stref koluwium i ich zmienności [11] oraz rozpoznaniu warunków hydrogeologicznych na obszarze osuwiska [12].

Metoda ERT jest kombinacją dwóch tradycyjnych metod elektrooporowych: sondowania i profilowania. Sondowanie polega na wertykalnym rozpoznaniu ośrodka na pojedynczym stanowisku pomiarowym. Profilowanie zapewnia natomiast rozpoznanie wzdłuż profilu przy stałym zasięgu głębokościowym [13]. Akwizycja danych w metodzie tomografii elektrooporowej polega na rozłożeniu prostoliniowego profilu składającego się z wielu elektrod rozmieszczonych w równych odległościach (rozstaw). Ich liczba oraz rozstaw dobierane

są w sposób arbitralny w zależności od rozwiązywanego problemu badawczego. Podczas pojedynczego pomiaru aparatura wybiera cztery elektrody (zgodnie z zadaniem pomiarowym), które stanowią układ pomiarowy. Dwie z nich (elektrody prądowe) emitują prąd stały w głąb ośrodka. Jednocześnie aparatura mierzy różnicę potencjałów pomiędzy elektrodami potencjałowymi (pomiarowymi) [14]. Ostatecznie wyznaczanym podczas pomiaru parametrem jest oporność pozorna wyrażana w omometrach (Ωm). Zależy ona między innymi od rodzaju badanego ośrodka, jego porowatości, nasycenia przestrzeni porowej czy rodzaju medium nasycającego. Wynikiem tomografii elektrooporowej jest przekrój oporności pozornej dający jakościową informację o budowie badanego ośrodka. Dla otrzymania informacji ilościowej konieczne jest dokonanie inwersji (rozwiązanie tzw. zadania odwrotnego) polegającej na iteracyjnym dopasowywaniu wynikowego modelu geoelektrycznego do rzeczywistych danych pomiarowych. Ostatecznym produktem inwersji jest rozkład oporności wyinterpretowanej w funkcji głębokości i odległości wzdłuż profilu [15]. Na jego podstawie, wykorzystując również dostępne informacje geologiczne, interpretator jest w stanie określić prawdopodobny przekrój litologiczny.

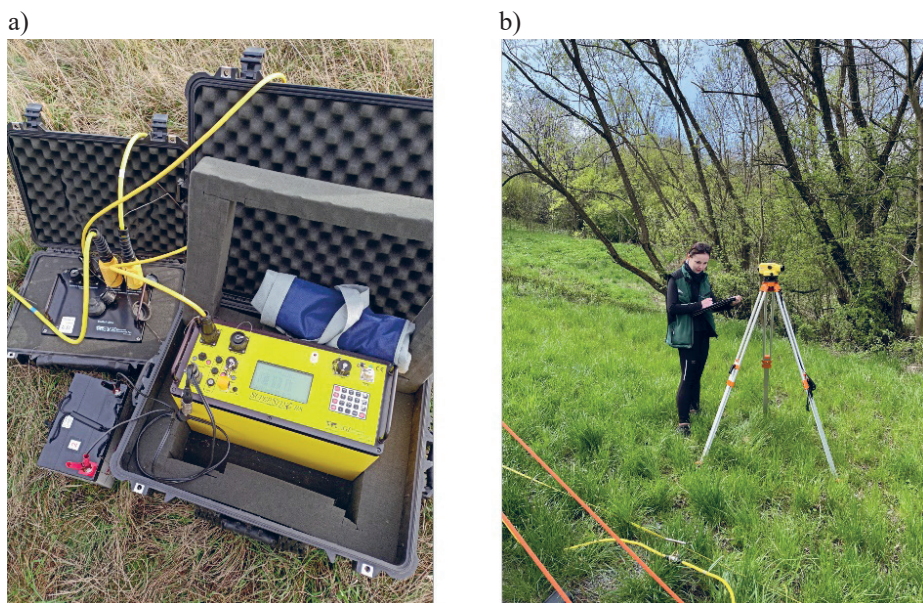


Rys. 4. Lokalizacja profili W-1 (żółty) i W-2 (niebieski) z zaznaczonymi otworami geologicznymi

Źródło mapy podkładowej: [6]

Badanie metodą tomografii elektrooporowej zostało przeprowadzone wzdłuż dwóch profili geoelektrycznych: W-1 i W-2 (rys. 4). Każdy z nich musiał być prostoliniowy, co wynika z założeń metody [16]. Profil W-1 prowadzony był w kierunku południowo-wschodnim z azymutem 158° . Miał długość 122 m, a odległość między elektrodami wynosiła 2 m. Składał się z 62 elektrod. Profil W-2 również przebiegał w kierunku południowo-wschodnim z azymutem 166° . Jego długość wynosiła 334 m; rozmieszczono na nim 168 elektrod o stałym rozstawie 2 m. Z uwagi na ograniczoną liczbę posiadanych elektrod (112) planowana długość profilu W-2 została osiągnięta dzięki technice *roll-along*. Po zakończeniu zbierania danych na podstawowej linii pomiarowej składającej się ze 112 elektrod początkowa sekcja kabla wraz z elektrodami była przenoszona na koniec i pomiar wykonywano ponownie. W przypadku profilu W-2 wykonano ten proces dwukrotnie. Za każdym razem przekładano dwa kable wraz z 28 elektrodami. Wyznaczone profile pomiarowe przecinały się ze sobą. Koniec profilu W-1 znajdował się na 32. metrze profilu W-2 (rys. 4).

Podczas akwizycji zastosowano układ pomiarowy *strong-gradient* z dodatkowymi instrukcjami dla układu Wennera o parametrze $a = 1$ i układu dipol-dipol o parametrach $a = 3$, $n = 1, 2, 3, 4, 5$. Dodatkowe instrukcje miały na celu podniesienie rozdzielczości (szczególnie w strefie przypowierzchniowej) dzięki zagęszczeniu punktów pomiarowych w strefie płytkiej. Pomiary wykonano z wykorzystaniem aparatury terenowej SuperSting R8/IP/SP firmy Advanced Geosciences Inc. (rys. 5a). Pozycję profili domierzono odbiornikiem GPS, natomiast niwelację terenu wykonano niwelatorem optycznym (rys. 5b). Rzędne terenu pozyskano z ogólnodostępnego numerycznego modelu terenu (NMT) o gęstości siatki $1\text{ m} \times 1\text{ m}$ ze strony geoportal.gov.pl [6].

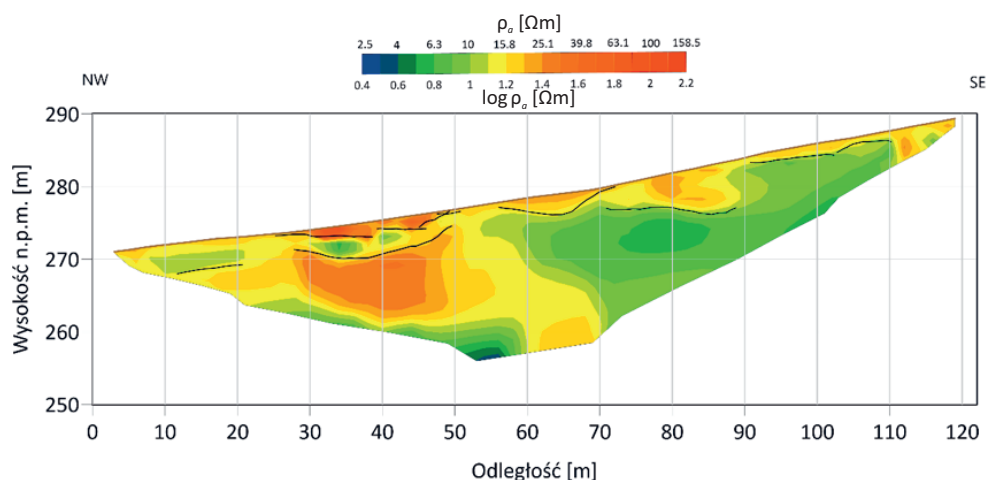


Rys. 5. Aparatura pomiarowa SuperSting podczas pomiarów (a) oraz pomiar rzeźby terenu wykonywany niwelatorem optycznym (b)

4. PRZETWARZANIE I INWERSJA DANYCH ERT

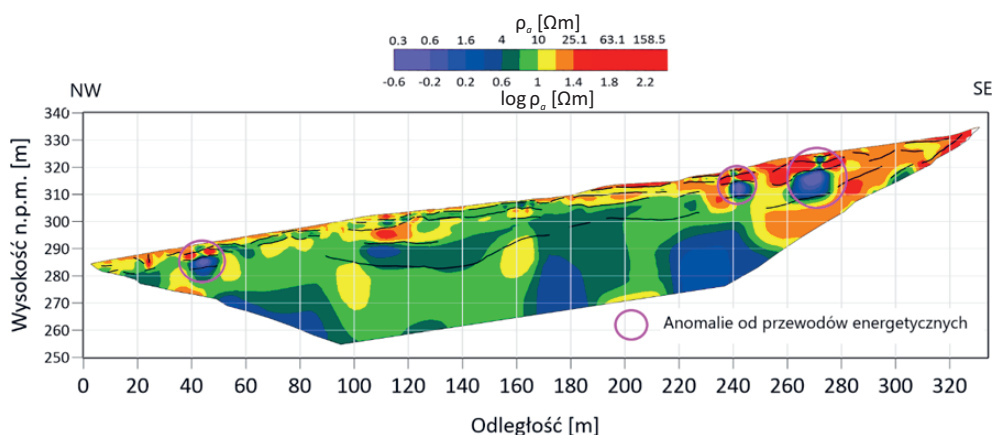
Dane pomiarowe z profili W-1 i W-2 zostały zaimportowane do programu Res2dinvx64. Do plików dołączono informacje o rzeźbie terenu, które są niezbędne do poprawnego przeprowadzenia zagadnienia odwrotnego [17]. Początkowym etapem przetwarzania było wykonanie procedury inwersji. W tym celu wybrano metodę L1 (robust). Pozostałe parametry inwersji pozostawiono jako domyślne. Miara dopasowania otrzymanego modelu był parametr *absolute error* (*Abs. error*). Przekrój W-1 po pierwszej inwersji składającej się z czterech iteracji osiągnął błąd dopasowania na poziomie 1,9%. W przypadku przekroju W-2 parametr *Abs. error* po czterech iteracjach osiągnął wartość 6,7%.

Następnym etapem przetwarzania było przeprowadzenie zaawansowanej filtracji danych z wykorzystaniem opcji *RMS Error statistics* na modelach po pierwszej inwersji. Procedura polega na usunięciu punktów pomiarowych, w których wartość oporności pozornej pomierzonej i wyliczonej różniła się procentowo o więcej niż pożądany błąd [18]. W odniesieniu do przekroju W-1 filtrację wykonano, przyjmując próg odcięcia 18%, natomiast w przypadku przekroju W-2 próg wynosił 20%. Tak odfiltrowane dane ponownie zostały poddane procedurze inwersji normą L1 (robust). Otrzymany po ośmiu iteracjach przekrój oporności wyinterpretowanej dla profilu W-1 (rys. 6) charakteryzował się błędem dopasowania 1,1%. Wpływ wykorzystanej filtracji na końcowe dopasowanie modelu zaznaczył się silniej w przypadku profilu W-2, w którym po ośmiu iteracjach przekrój oporności wyinterpretowanej osiągnął błąd dopasowania 2,3% (rys. 7), co stanowiło znaczną poprawę w porównaniu z wartością 6,7% przed wykorzystaniem opcji *RMS Error statistics*. Na wyinterpretowanym przekroju W-2 zaznaczono również charakterystyczne obszary anomalne, które powiązano z obecnością podziemnej infrastruktury parku przecinającej profile badawcze (rys. 7).



Rys. 6. Przekrój oporności wyinterpretowanej W-1 z naniesionym rozkładem gradientów zmian oporności wyinterpretowanej (czarne, ciągłe linie)

Końcowym etapem przetwarzania danych było wykorzystanie niekonwencjonalnej metody polegającej na obliczeniu rozkładów gradientów pionowych i poziomych zmian oporności wyinterpretowanej z wykorzystaniem programu Surfer. Następnie wyznaczono manualnie rozkład maksymalnych wartości gradientów, które wskazują strefy „najszybszych” zmian analizowanego parametru (oporności wyinterpretowanej). Obszary te mogą być związane ze zmianami litologii [19]. Metoda ta jest szczególnie przydatna w odniesieniu do utworów charakteryzujących się niewielkim kontrastem oporności elektrycznych.



Rys. 7. Przekrój oporności wyinterpretowanej W-2 z naniesionym rozkładem gradientów zmian oporności wyinterpretowanej (czarne, ciągłe linie) i zaznaczonymi anomaliami wywołanymi obecnością przewodów energetycznych

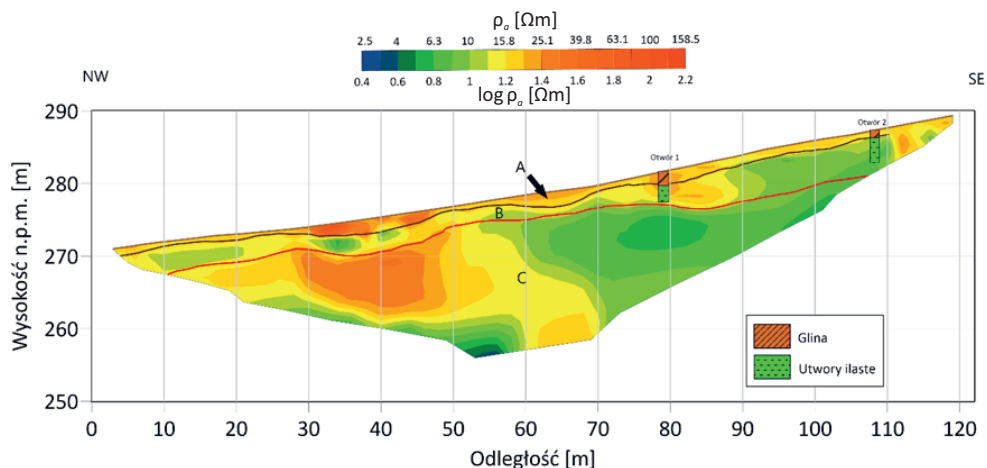
Wyznaczone rozkłady maksymalnych gradientów naniesiono na przekroje oporności wyinterpretowanej dla profilu W-1 (rys. 6) i profilu W-2 (rys. 7). W przypadku przekroju W-1 miały one przebieg zbliżony do równoległego w stosunku do ukształtowania terenu. Wzdłuż całego profilu zaznaczały się na dwóch głębokościach: około 2 m i 4 m. Rozkład maksymalnych gradientów pionowych i poziomych na przekroju W-2 był znacznie bardziej skomplikowany. Wpływ na to miało dużo większe zróżnicowanie geoelektryczne wynikowego modelu. Nie bez znaczenia było również występowanie obszarów anomalnych związanych z infrastrukturą podziemną (np. instalacjami elektrycznymi), które znacznie zaburzały rozkład maksymalnych gradientów (rys. 7). Na przekroju W-2 liczne struktury liniowe na rozkładzie gradientów zaznaczały się najsilniej w jego centralnej części, tj. pomiędzy 100. a 240. metrem profilu.

5. WYNIKI I ICH ANALIZA

Zastosowana metodyka umożliwiła w przypadku przekroju W-1 zobrazowanie ośrodka do około 21 m w głąb. Analiza rozkładów oporności wyinterpretowanej i gradientów pionowych oraz poziomych zmian oporności pozwoliła na wyznaczenie trzech stref geoelektrycznych (rys. 8).

Są to:

- Strefa A. Warstwa przypowierzchniowa, charakteryzuje się małą zmiennością oporności wyinterpretowanej – w zakresie 13–30 Ωm . Jedynie w obszarze pomiędzy 30. a 48. metrem profilu oporności wzrastają do 100 Ωm . Anomalia ta związana jest najpewniej z przecinaniem parkowej ścieżki zbudowanej z piasku i żwiru, która była dodatkowo odwadniana. Miąższość strefy wynosi od 0,5 m do 2 m.
- Strefa B. Wyznaczona została przez obniżenie wartości oporności wyinterpretowanej w stosunku do warstwy nadległej. Jej oporności mieszczą się w zakresie 6–20 Ωm . Miąższość waha się od 1 m do 5 m.
- Strefa C. Podłoże badanego obszaru, charakteryzuje się wysoką zmiennością oporności wyinterpretowanej – w zakresie 5–30 Ωm . Wyższe oporności zaobserwowano do 60. metra przekroju. Najprawdopodobniej wynika to ze zróżnicowanej litologii podłoża.

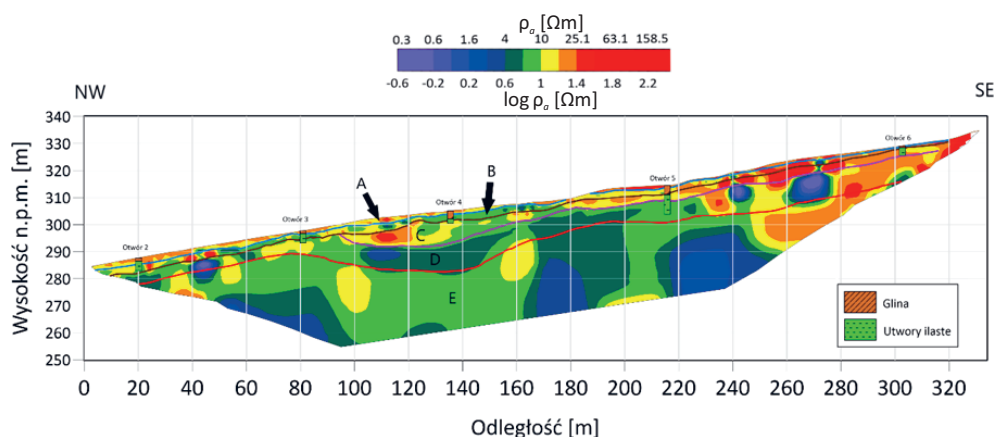


Rys. 8. Wydzielone strefy geoelektryczne na przekroju W-1 z naniesionymi informacjami otworowymi

Przekrój W-2 dzięki zastosowanej metodyce osiągnął zasięg głębokościowy wynoszący około 42 m. W związku z jego bardziej skomplikowaną budową rozkłady oporności wyinterpretowanej oraz maksymalnych gradientów pionowych i poziomych pozwoliły na wyznaczenie pięciu stref geoelektrycznych (rys. 9):

- Strefa A. Warstwa przypowierzchniowa, charakteryzuje się opornościami w zakresie 13–35 Ωm i miąższością od 0 m (między 168. a 178. metrem profilu) do 2 m.
- Strefa B. Stanowi wydzielenie o obniżonej oporności wyinterpretowanej (6–20 Ωm) w stosunku do warstwy nadległej. Wyższe oporności występują w obszarach anomalii wywołanych przewodami energetycznymi. Jej miąższość wynosi 1–2 m.
- Strefa C. Warstwa ta charakteryzuje się nieznacznie podwyższonymi opornościami (8–25 Ωm) w stosunku do strefy B. Z powodu niskiego kontrastu oporności wyinterpretowanej pomiędzy strefą B i C podczas wyznaczania strefy C opierano się głównie na rozkładzie gradientów. Zaczyna się ona na około 90. metrze przekroju i kontynuuje się do końca obszaru badań. Jej miąższość jest silnie zróżnicowana. W centralnej części przekroju (między 110. a 140. metrem) osiąga 8 m, lecz od 160. metra profilu wynosi średnio 3 m.

- Strefa D. Charakteryzuje się niską opornością wyinterpretowaną – w zakresie 5–13 Ωm . Znajdują się w niej fragmenty zarówno o skrajnie niskich, jak i skrajnie wysokich wartościach oporności wyinterpretowanej. Możliwe, że na zakłócenia na tym obszarze nałożyły się efekty wywołane obecnością przewodów oraz przebiegiem granicy obszaru badań, przez co model geoelektryczny miał trudność w dopasowaniu się. Prawdopodobne jest również silne odwodnienie obszaru związane z zastosowaną w parku infrastrukturą odwadniającą. Miąższość strefy wynosi od 4 m (początek profilu W-2) do 11 m (między 120. a 140. metrem profilu).
- Strefa E. Podłoże badanego obszaru, charakteryzuje się silnie zróżnicowaną opornością wyinterpretowaną – w zakresie 3–20 Ωm . Można w nim wyznaczyć zarówno fragmenty o obniżonej (między 160. a 200. metrem i między 220. a 250. metrem profilu), jak i podwyższonej (od 250. metra do końca przekroju) oporności wyinterpretowanej.



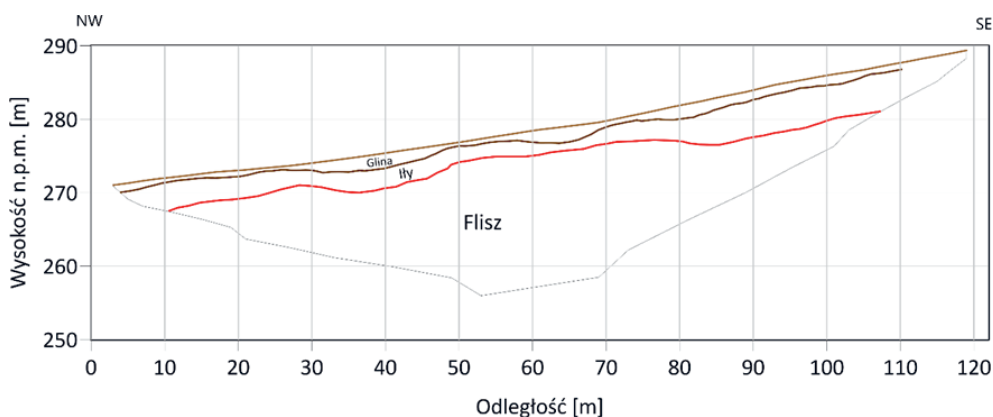
Rys. 9. Wydzielone strefy geoelektryczne na przekroju W-2 z naniesionymi informacjami otworowymi

Na podstawie rozkładu oporności wyinterpretowanej, uzyskanego przebiegu gradientów, dostępnych informacji otworowych oraz obserwacji terenowych przeprowadzono interpretację litologiczną uzyskanych modeli geoelektrycznych.

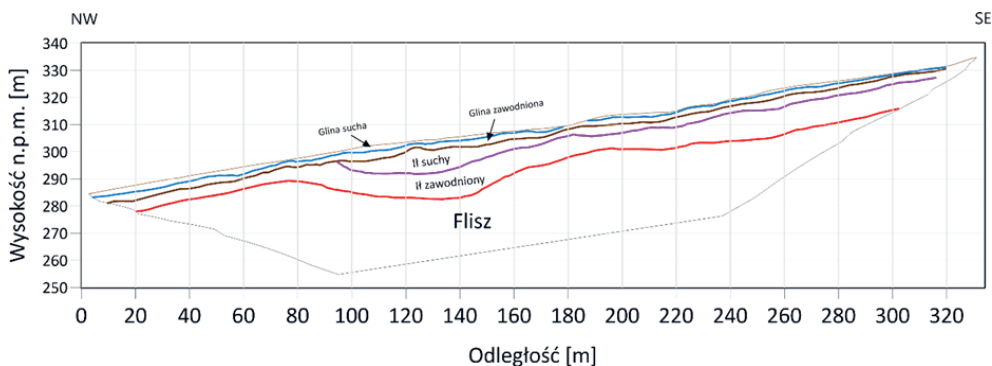
Przekrój W-1 charakteryzuje się nieskomplikowaną, trójwarstwową budową (rys. 10). Pierwsza warstwa została określona jako gliny o miąższości 0.5–2 m. Zostały one najpewniej zastąpione materiałem piaszczysto-żwirowym do budowy parkowej ścieżki pomiędzy 30. a 48. metrem profilu. Dla uogólnienia wyników nie uwzględniono tego w zamieszczonym modelu. Drugą warstwą są utwory ilaste o miąższości 1–5 m. Poniżej występuje podłoże fliszowe o zróżnicowanej litologii. Wysokooporowy fragment (do 60. metra profilu) może świadczyć o większym udziale piaskowca i/lub mniejszym spękanii. Następujący dalej odcinek profilu o niższej oporności odpowiada, dominującemu na obszarze badań, podłożu zbudowanemu z łupków.

Przekrój W-2 charakteryzuje się większą liczbą wydzieleni litologicznych (rys. 11). Ich wyznaczenie było możliwe dzięki większemu zasięgowi głębokościowemu (w porównaniu z przekrojem W-1), jak również uwzględnieniu rozkładu maksymalnych gradientów, co było szczególnie przydatne w strefie niewielkich kontrastów oporności. Pierwszym wydzieleniem

są gliny suche o miąższości do 2 m. Poniżej wyznaczono warstwę glin zawodnionych. Jej obecność potwierdzały dostępne informacje otworowe oraz obniżona oporność wyinterpretowana w stosunku do warstwy glin suchych. Miąższość glin zawodnionych waha się w przedziale 1–2 m. Na około 180. metrze profilu możliwe są przebicia hydrauliczne glin zawodnionych na powierzchnię. Niżej zalegają utwory ilaste, w których zlokalizowano pierwszy poziom wodonośny na badanym obszarze. Iły są całkowicie zawodnione od początku przekroju W-2 do około 90. metra. Ich miąższość w tym fragmencie wynosi około 4 m. Od 90. metra profilu ich miąższość znacznie wzrasta, osiągając maksymalnie 18 m. Jest to spowodowane ukształtowaniem podłoża. Od tego miejsca w warstwie iłów wydzielono iły suche (miąższość 3–8 m) oraz iły zawodnione (miąższość 8–11 m). Podłoże przekroju W-2 stanowi flisz zbudowany głównie z łupków. Obszary o obniżonej oporności wyinterpretowanej (między 160. a 200. metrem oraz między 220. a 250. metrem) mogą sugerować występowanie stref silnie spękanych, stanowiących preferowany kierunek migracji wody w głąb ośrodka. Fragment podłoża o podwyższonej oporności wyinterpretowanej (od 250. metra do końca przekroju) może wskazywać na większy udział piaskowca we fliszu i/lub silnie osuszoną część profilu W-2 w wyniku zastosowania w parku infrastruktury odwadniającej.

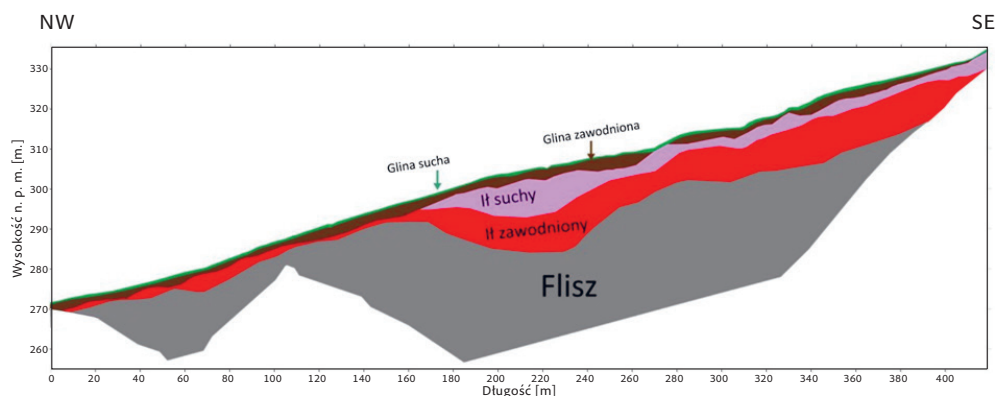


Rys. 10. Interpretacja litologiczna przekroju geoelektrycznego W-1



Rys. 11. Interpretacja litologiczna przekroju geoelektrycznego W-2

Na podstawie interpretacji litologicznej przekrojów W-1 i W-2 stworzono końcowy model budowy geologicznej badanego obszaru (rys. 12). Pierwszą warstwę stanowią gliny suche o miąższości około 1 m. Następnie na całym profilu badawczym wydzielono gliny zawodnione. Uczyniono tak, mimo że na profilu W-1 nie wyinterpretowano wcześniej glin zawodnionych. Wynikało to najpewniej ze zbyt małego zasięgu głębokościowego osiągniętego na przekroju W-1, który to nie pozwolił na pełne zobrazowanie badanego ośrodka. W związku z tym interpretacja opierała się w dużej mierze na informacjach otworowych, które ze względu na dynamikę zmian w obszarach osuwiskowych mogły nie być wystarczająco aktualne. Występowanie glin zawodnionych było efektem opadów deszczu poprzedzających wykonanie badania. Ich wydzielenie świadczy o utrudnionej infiltracji wody opadowej w głąb ośrodka. Prowadzi to do zmniejszenia siły tarcia zarówno pomiędzy gliną suchą a zawodnioną, jak i między gliną zawodnioną a zalegającymi poniżej utworami ilastymi. Podczas ulewnych opadów może to zmniejszyć stateczność zbocza i doprowadzić do aktywacji ruchów masowych wzdłuż wyżej wymienionych granic. Mechanizm ten był zapewne przyczyną uszkodzenia infrastruktury parku, które nastąpiło po intensywnych opadach deszczu w sierpniu 2021 roku. Miąższość warstwy glin zawodnionych wynosiła średnio 2–3 m. Przebieg warstwy sugeruje również występowanie przebicia hydraulicznego na powierzchnię na około 270. metrze długości modelu. Utwory ilaste wykazały bardzo zróżnicowaną miąższość. Do około 160. metra przekroju ich miąższość wynosiła średnio 2 m i były one zawodnione. Dalej wzdłuż profilu miąższość iłów silnie wzrastała, co było spowodowane ukształtowaniem podłoża. Na odcinku między 180. a 250. metrem wystąpiło obniżenie podłoża, w którym to miąższość iłów osiągnęła nawet 18 m. Dalej wynosiła ona około 10–12 m. Od 160. metra przekroju dokonano również podziału na ropy suche i zawodnione, co odzwierciedlało przebieg poziomu wodonośnego. ropy suche miały miąższość 3–8 m, natomiast ropy zawodnione 8–11 m. Podłoże obszaru badań zbudowane jest z fliszu, w którym dominują łupki. W jego ukształtowaniu od 160. metra profilu można wyznaczyć charakterystyczny kształt misy osuwiskowej. Może ona stanowić preferowany kierunek rozwoju ruchów masowych. O potencjalnej aktywności płaszczyzny poślizgu na granicy il-flisz pomiędzy 180. a 240. metrem przekroju świadczy zwiększona w porównaniu z resztą modelu miąższość koluwium (szczególnie utworów ilastych).



Rys. 12. Końcowy model budowy geologicznej osuwiska powstały z połączonej interpretacji przekrojów W-1 i W-2

6. PODSUMOWANIE I WNIOSKI

Park miejski „Stok pod Baranem” w Wieliczce położony jest na obszarze osuwiska. Powoduje to kosztowne w skutkach uszkodzenia infrastruktury parku podczas wystąpień ruchów masowych. W celu lepszego poznania budowy geologicznej obszaru wykonano badania geofizyczne metodą ERT. Metoda tomografii elektrooporowej z zastosowaniem niekonwencjonalnej procedury interpretacji pozwoliła na określenie budowy litologicznej, sytuacji hydrogeologicznej oraz granic między warstwami. Otrzymane wyniki umożliwiły stworzenie prawdopodobnego modelu 2D budowy osuwiska.

Obszar badań charakteryzował się skomplikowaną budową geologiczną. Pierwszą warstwą litologiczną były gliny polodowcowe. Wydzielone w nich zostały gliny suche oraz zawodnione. Obecność utworów o większym nasyceniu wodą przypisano opadom deszczu w dniu poprzedzającym wykonanie pomiarów. Ich wykrycie świadczy o utrudnionej infiltracji wód opadowych w głąb ośrodka. Może to prowadzić do zmniejszenia tarcia pomiędzy glinami zawodnionymi i utworami ilastymi. Poniżej warstwy glin wyznaczono ility, w których znajdował się pierwszy poziom wodonośny. Podłoże zbudowane było z fliszu reprezentowanego głównie przez łupki. W centralnej części przekroju w podłożu zaznaczył się charakterystyczny kształt misy osuwiskowej. Może ona wyznaczać preferowany kierunek propagacji ruchów masowych z płaszczyzną poślizgu na granicy ilt-flisz. Przemawia za tym zwiększona miąższość koluwium (szczególnie utworów ilastych).

Podsumowując, można stwierdzić, że uzyskane wyniki wskazują na wysokie ryzyko ponownego wystąpienia ruchów masowych na obszarze „Stoku pod Baranem” i w konsekwencji dalszego możliwego uszkodzania infrastruktury parku. Świadczy o tym obecność charakterystycznych form osuwiskowych, skomplikowana sytuacja hydrogeologiczna oraz wiele potencjalnych płaszczyzn poślizgu. W celu dokładniejszego rozpoznania wykrytych struktur (szczególnie morfologii misy osuwiskowej) należałoby wykonać dodatkowe badania geofizyczne w wariantcie 3D.

Podziękowania

Autorzy pragną podziękować opiekunom projektu, dr. inż. Grzegorzowi Bani, dr. inż. Kamilowi Cichostępskiemu i dr. inż. Jerzemu Karczewskiemu, za zaangażowanie oraz wsparcie swoją wiedzą i umiejętnościami. Podziękowania składają również wszystkim członkom Koła Naukowego Geofizyków AGH „Geofon”, którzy wzięli udział w pomiarach terenowych oraz w realizacji kolejnych etapów projektu. Specjalne podziękowania autorzy kierują do recenzentów za poświęcony czas oraz cenne uwagi, które przyczyniły się do wzbogacenia treści artykułu.

Praca została wykonana w ramach projektu „Badanie osuwiska w rejonie Wieliczki przy pomocy metod geofizycznych oraz Numerycznego Modelu Terenu”, który otrzymał dofinansowanie w konkursie Grant Rektora Akademii Górniczo-Hutniczej im. Stanisława Staszica w Krakowie – grant nr 36/GRANT/2023.

LITERATURA

- [1] Cała M., *Osuwiska w Polsce i na świecie*, Nowoczesne Budownictwo Inżynieryjne, nr 3, 2009, s. 68–74.
- [2] Mita M., Glazer M., Kaczmarczyk R., Dąbrowski M., Mita K., *Case study of electrical resistivity tomography measurements used in landslides investigation, Southern Poland*, Contemporary Trends in Geoscience, vol. 7, iss. 1, 2018, s. 110–126, <https://doi.org/10.2478/ctg-2018-0007>.
- [3] Graniczny M., Piątkowska A., Czarnogórska M., Kowalski Z., *Geohazards in Poland – Rea WP3 activity*, Polish Geological Institute Special Papers, vol. 24, 2008, s. 37–44.
- [4] Wójcik A., Wojciechowski T., *Osuwiska jako jeden z ważniejszych elementów zagrożeń geologicznych w Polsce*, Przegląd Geologiczny, vol. 64, nr 9, 2016, s. 701–709.
- [5] Jongmans D., Garambois S., *Geophysical investigation of landslides: A review*, Bulletin Société Géologique de France, vol. 178, no. 2, 2007, s. 101–112, <https://doi.org/10.2113/gssgfbull.178.2.101>.
- [6] Geoportal Krajowy, <https://mapy.geoportal.gov.pl/> [dostęp: 1.12.2023].
- [7] Państwowy Instytut Geologiczny, GeoLOG – aplikacja Centralnej Bazy Danych Geologicznych (CBDG), <https://geolog.pgi.gov.pl/> [dostęp: 3.12.2023].
- [8] Baran P., Kozielska-Sroka E., Krzyk P., Augustyn P., *Ocena geotechniczna stopnia aktywności osuwiska „Stok pod Baranem” w sąsiedztwie obszaru górniczego Kopalni Soli Wieliczka*, Przegląd Górniczy, t. 70, nr 4, 2014, s. 106–113.
- [9] Ostrowski S., Pacanowski G., Majer E., Sokołowska M. (red.), *Badania geologiczno-inżynierskie: geofizyka inżynierska*, Państwowy Instytut Geologiczny – Państwowy Instytut Badawczy, Warszawa 2023.
- [10] Perrone A., Lapenna V., Piscitelli S., *Electrical resistivity tomography technique for landslide investigation: A review*, Earth-Science Reviews, vol. 135, 2014, s. 65–82, <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2014.04.002>.
- [11] Luhn J., Stumvoll-Schmaltz M.J., Orozco A.F., Glade T., *Internal structure of an active landslide based on ERT and DP data: New insights from the Hofermühle landslide observatory in Lower Austria*, Geomorphology, vol. 441, 2023, 108910, <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2023.108910>.
- [12] Su L., Xu X., Geng X., Liang S., *An integrated geophysical approach for investigating hydro-geological characteristics of debris landslide on the Wenchuan earthquake area*, Engineering Geology, vol. 219, 2017, s. 52–63, <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2016.11.020>.
- [13] Koefoed O., *Geosounding Principles, I: Resistivity Sounding Measurements*, Methods in Geochemistry and Geophysics, Elsevier Science Publishing Co., Amsterdam 1979.
- [14] Dahlin T., *The development of DC resistivity imaging techniques*, Computers & Geosciences, vol. 27, iss. 9, 2001, s. 1019–1029, [https://doi.org/10.1016/S0098-3004\(00\)00160-6](https://doi.org/10.1016/S0098-3004(00)00160-6).
- [15] Bania G., Ćwiklik M., *Płytką budowa geologiczna otoczenia wzgórza wawelskiego (Kraków, Polska) – wyniki badań metodą tomografii elektrooporowej*, [w:] Wardas-Lasoń M. (red.), *Nawarstwienia historyczne miast Europy Środkowej*, Wydawnictwa AGH, Kraków 2016, s. 425–434.

- [16] Loke M.H., *Tutorial: 2-D and 3-D electrical imaging survey*, Geotomo Software, Malaysia 2023.
- [17] Loke M.H., *Topographic modelling in electrical imaging inversion*, [w:] *EAGE 62nd Conference and Technical Exhibition SECC: Glasgow 2000: Glasgow, Scotland, 29 May–2 June 2000: Poster Presentations: Extended Abstracts Book, Vol. 2*, cp-28-00103, European Association of Geoscientists & Engineers, The Netherlands 2000, <https://doi.org/10.3997/2214-4609-pdb.28.D2>.
- [18] Loke M.H., *Rapid 2D Resistivity & IP Inversion using least-squares method*, Geotomo Software, Malaysia 2003.
- [19] Bania G., Woźniak T., *Subsurface imaging of fluvial deposits of the Wisła River valley in Kraków (southern Poland) by 2D ERT survey*, *Geological Quarterly*, vol. 66, no. 23, 2022, 23, <https://doi.org/10.7306/gq.1655>.

Patryk Tokarz*

ANALIZA DRGAŃ KONSTRUKCJI FUNDAMENTU POD DMUCHAWĘ CIĄGU SPALIN

Przedmiotem artykułu jest model MES blokowego fundamentu żelbetowego pod dmuchawę ciągu spalin. Urządzenia tego typu są wykorzystywane w instalacjach odprowadzających spaliny na przykład z pieca ciepłowniczego. W niniejszej pracy przeanalizowano drgania modelu fundamentu z rozmieszczonymi elementami mechanicznymi (takimi jak silnik, łożyska i dmuchawa) opisanymi jako punktowe masy z odpowiednimi własnościami bezwładnościowymi. Obciążenia modelu MES stanowią siły harmoniczne wynikające z ruchu obrotowego wału i z przyjętych mimośrodów niewyważenia masowego silnika i dmuchawy. Analizowano przemieszczenia oraz prędkości drgań wybranych punktów modelu fundamentu. Obliczenia wykonano za pomocą programu Hexagon.Marc.

VIBRATION ANALYSIS OF THE FOUNDATION STRUCTURE FOR THE EXHAUST GAS BLOWER

The subject of the article is an FEM model of a block reinforced concrete foundation for an exhaust gas blower. Devices of this type are used in installations discharging exhaust gases, e.g. from a heating furnace. This work analyzes the vibrations of a foundation model with distributed mechanical elements (including engine, bearings, blower) described as point masses with appropriate inertial properties. The loads of the FE model are harmonic forces resulting from the rotational motion of the shaft and the assumed mass unbalance eccentricities of the engine and blower. The displacements and vibration velocities of selected points of the foundation model were analyzed. Calculations were performed using the Hexagon.Marc program.

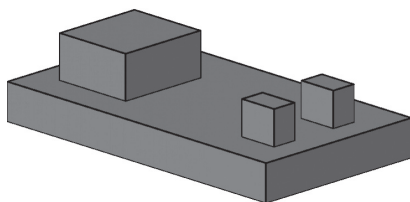
1. WSTĘP

W zakładach przemysłowych, w których wykorzystanie maszyn i mechanizmów jest podstawą procesów technologicznych, fundamenty pod te urządzenia odgrywają kluczową rolę – stanowią bowiem konstrukcje umożliwiające bezpieczną i niezawodną pracę urządzeń.

* AGH Akademia Górniczo-Hutnicza, Wydział Inżynierii Lądowej i Gospodarki Zasobami, Koło Naukowe Mechaniki Konstrukcji „Aksjator”.

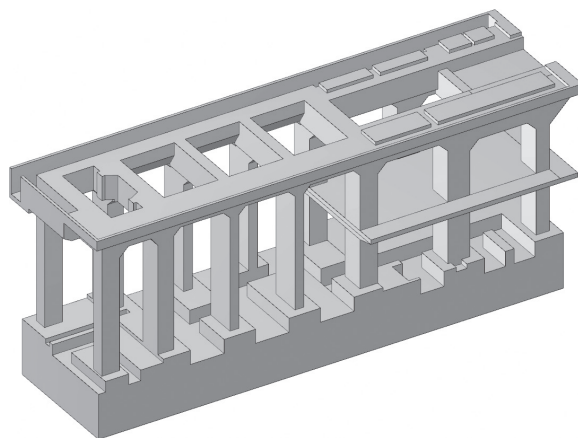
Tak więc fundamenty pod maszyny są specjalnym rodzajem fundamentów w budownictwie, które nie tylko przenoszą obciążenia statyczne i dynamiczne na grunt, ale również zapewniają spełnienie warunków użytkowania maszyn, dyssypację drgań generowanych w gruncie itp. Fundamenty pod maszyny znajdują zastosowanie głównie w przemyśle energetycznym.

Wyróżnia się dwa główne podziały fundamentów pod maszyny. Najczęściej stosowanym typem fundamentów pod maszyny są fundamenty blokowe (rys. 1). Wykonane są w postaci pełnego bloku żelbetowego. W zależności od potrzeb technologicznych mogą one sięgać swoją rozbudowaną częścią nadziemną do poziomu następnego stropu kondygnacji budynku. Fundamenty blokowe charakteryzują się dużą sztywnością konstrukcyjną, co oznacza, że nieznaczne wartości odkształceń są pomijane, a bloki traktowane są zwykle jako sztywne.



Rys. 1. Fundament blokowy

Kolejnym rodzajem fundamentów pod maszyny są fundamenty ramowe (rys. 2). Są to konstrukcje o znacznych wysokościach, składające się z dolnej i górnej płyty, na której spoczywa maszyna, oraz układu słupów zapewniających odpowiednią sztywność. Górna płyta fundamentu ma zwykle wiele otworów, przez które doprowadzane są instalacje i wyposażenie maszyny. Przestrzeń pomiędzy płytą górną i płytą dolną jest przeznaczona na montaż różnego rodzaju urządzeń pomocniczych wspomagających pracę głównej maszyny. Fundamenty ramowe znajdują zastosowanie zwykle w urządzeniach szybkoobrotowych jak na przykład turbogeneratory.



Rys. 2. Fundament ramowy

Źródło: [1]

Dmuchawa ciągu spalin jest zespołem urządzeń, które w całości tworzą maszynę wykorzystywaną w procesie technologicznym odprowadzenia spalin z komory spalania bezpośrednio do komina. Zastosowanie takiej technologii pozwala na zmniejszenie wysokości efektywnej kominów. Dmuchawa ciągu spalin składa się z wielu podzespołów, między innymi wału z wirnikiem dmuchawy, silnika i łożysk.

W pracy utworzono model MES przykładowego fundamentu blokowego żelbetowego pod dmuchawę ciągu spalin; elementy mechaniczne (m.in. silnik, łożyska, dmuchawa) opisano jako punktowe masy z odpowiednimi własnościami bezwładnościowymi. Geometrię oraz inne parametry techniczne konstrukcji przyjęto, wzorując się na istniejącym fundamencie. Konstrukcję obciążono siłami harmonicznymi wynikającymi z ruchu obrotowego wału i z przyjętych mimośrodków dla środka ciężkości dmuchawy i wału e_d oraz wirnika silnika elektrycznego e_s .

Celem zaprezentowanych analiz było wyznaczenie częstości drgań własnych oraz przemieszczeń i prędkości drgań w wybranych punktach fundamentu przy ustalonym wzbudzeniu.

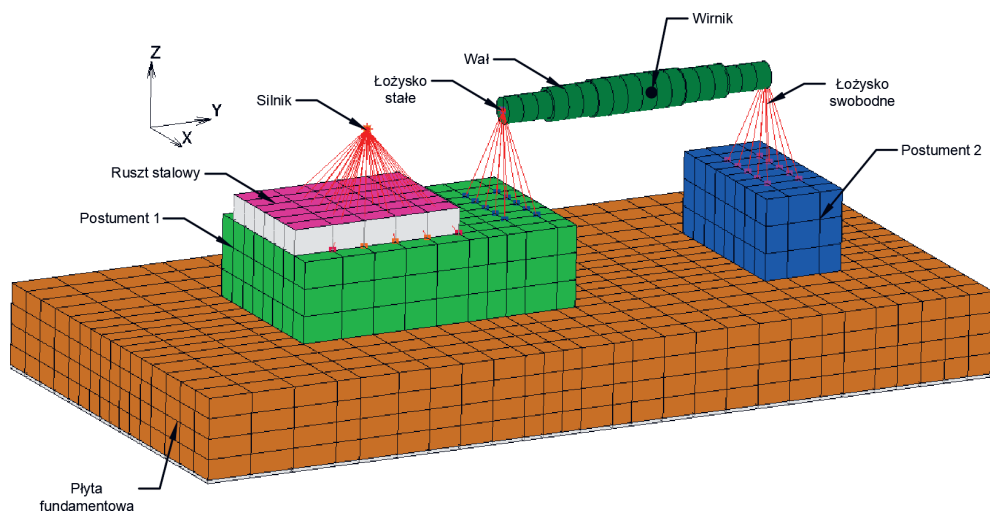
2. MODEL MES FUNDAMENTU POD DMUCHAWĘ CIĄGU SPALIN

Budując model numeryczny MES, na wstępie odwzorowano geometrię fundamentu oraz elementów mechanicznych całej konstrukcji. Zdefiniowano warunki brzegowe i obciążenia – zarówno statyczne, jak i dynamiczne. Działania te wraz z dyskretyzacją problemu pozwoliły zdefiniować cały model obliczeniowy.

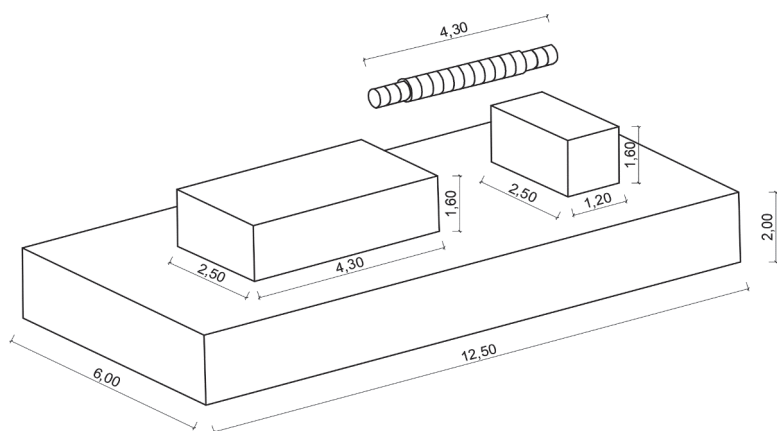
2.1. CHARAKTERYSTYKA ORAZ GEOMETRIA MODELU

Przy odwzorowaniu geometrii analizowanej konstrukcji posłużono się szeregiem uproszczeń. Przyjęto, że model analizowanego fundamentu żelbetowego (rys. 3 i 4) składał się z płyty, postumentu nr 1 pod silnik i łożysko stałe oraz postumentu nr 2 pod łożysko swobodne. Silnik oraz łożyska odwzorowano jako zastępcze masy skupione w węzłach, którym przypisano także masowe momenty bezwładności. Węzły te na sztywno związane elementami RBE2 z węzłami powierzchni, do których modelowane elementy są fizycznie przymocowane – mimośrodowo mocowania tych mas wynikają z położenia geometrycznego wspólnej osi wałów silnika i dmuchawy. Wał o długości 4,3 m stanowi belkę o przekroju walca o zmiennej średnicy (od 0,4 m do 0,55 m), swobodnie podpartą na łożyskach. W rzeczywistych warunkach łożysko swobodne i łożysko stałe pełnią funkcję podpór wału i umożliwiają jego obrót. łożysko swobodne pozwala na swobodne ruchy wału w kierunku osiowym, z kolei łożysko stałe blokuje ten ruch. W modelu obliczeniowym funkcję tę spełniały więzy RBE2 łączące węzły wału z łożyskami (rys. 3).

Masy podzespołów istotnie wpływających na analizowane zjawiska dynamiczne zestawiono w tabeli 1.



Rys. 3. Elementy podzespołów urządzeń dmuchawy ciągu spalin



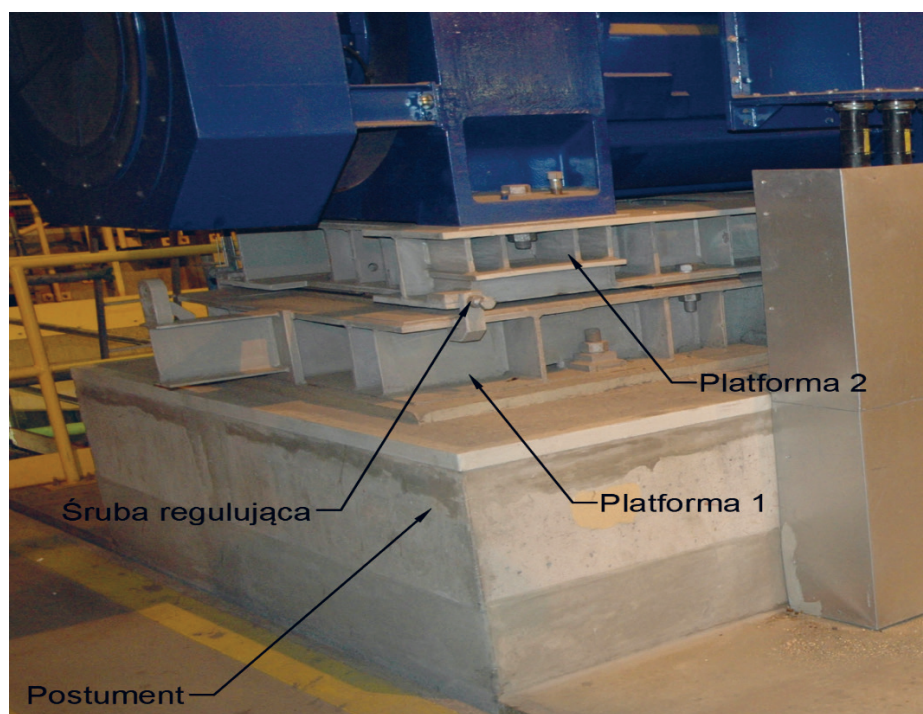
Rys. 4 Przyjęte wymiary (w metrach) geometryczne analizowanego modelu numerycznego

Tabela 1. Zestawienie podzespołów urządzeń dmuchawy ciągu spalin

Nazwa urządzenia	Masa [kg]
Silnik elektryczny	10 930
Ruszt stalowy	2 100
Łożysko stałe	8 390
Łożysko swobodne	8 163
Wirnik dmuchawy (dmuchawa)	4 000
Wał dmuchawy	6 076

Przyjęto, że w środku rozpiętości wału zamocowany został wirnik dmuchawy, obracający się z prędkością eksploatacyjną około $n = 900$ obr/min; z uwagi na brak przekładni redukcyjnych jest to jednocześnie prędkość obrotowa silnika. Podczas ruchu obrotowego generowane są siły odśrodkowe – do ich wyliczenia przyjęto mimośrodów środków ciężkości – zarówno dmuchawy, jak i wału równe: $e_d = e_s = 0,03 \cdot 10^{-3}$ m.

Warto też wyjaśnić, że w rzeczywistych warunkach pracy konstrukcji silnik, który napędza całość zespołu, nie jest umieszczony bezpośrednio na postumencie nr 1 analizowanego fundamentu. Spoczywa on na dwóch stalowych platformach (rusztach), z których pierwsza jest zamocowana za pomocą kotew bezpośrednio i na trwale do postumentu nr 1. Druga z platform jest przymocowana do korpusu silnika. Takie pośrednie mocowanie umożliwia regulację osiowości wału silnika i dmuchawy, co jest warunkiem koniecznym poprawnej pracy całego zespołu urządzeń. Na rysunku 5 przedstawiono przykład takiego rozwiązania technicznego z widocznymi śrubami regulującymi (korekcyjnymi zwanymi także lewar-
kami [2]).



Rys. 5. Przykładowe mocowanie silnika do fundamentu żelbetowego

W modelu MES oba ruszty zamodelowano jako płytę stalową o zastępczej grubości $t = 380$ mm i zastępczej gęstości $\rho_z = 1105$ kg/m³ z fizycznym mimośrodem powierzchni środkowej $e_r = t/2$ w stosunku do powierzchni postumentu nr 1 pod silnik. Zastępcza gęstość wynika z przyjętych wymiarów powierzchni rusztu $2,5$ m $\times$ 2 m.

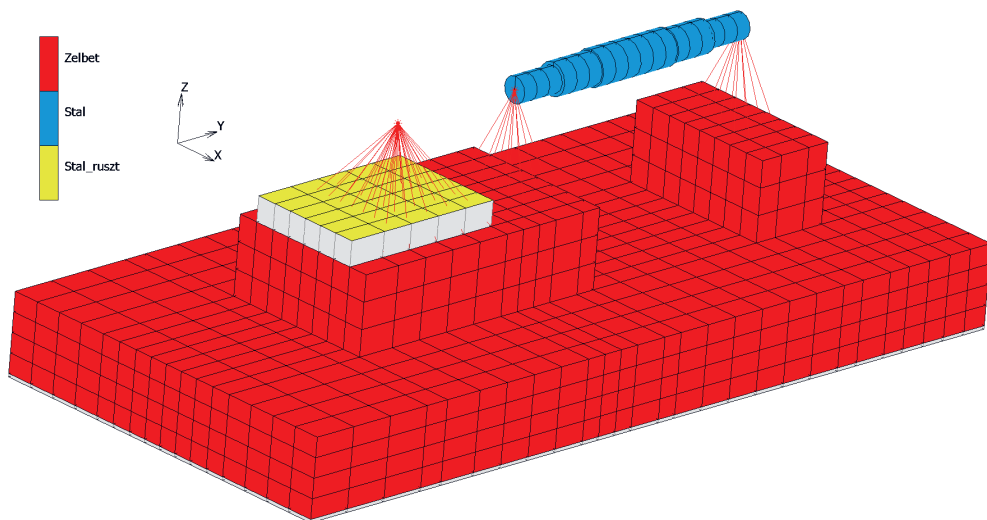
2.2. CHARAKTERYSTYKI MATERIAŁOWE

W tabeli 2 zestawiono dane materiałowe przyjęte w analizie. W zakresie przeprowadzonych obliczeń liniowych dane te są wystarczające.

Tabela 2. Parametry materiałowe poszczególnych elementów modelowanej konstrukcji

Dane materiałowe przyjęte w pracy	Wartość
Beton: – moduł Younga E_b – współczynnik Poissona ν_b – gęstość ρ_b – bezwładnościowy współczynnik tłumienia α_b – sztywnościowy współczynnik tłumienia β_b	34 GPa 0,16 2400 kg/m ³ 0,01 0,002
Stal (wał): – moduł Younga E_s – współczynnik Poissona ν_s – gęstość ρ_s – bezwładnościowy współczynnik tłumienia α_s – sztywnościowy współczynnik tłumienia β_s	210 GPa 0,3 7850 kg/m ³ 0,01 0,0005
Grunt: – gęstość ρ_g – stopień zagęszczenia I_d – współczynnik Poissona ν_g – współczynnik sprężystości podłoża C_z – bezwładnościowy współczynnik tłumienia α_g – sztywnościowy współczynnik tłumienia β_g	1800 kg/m ³ 0,7 0,35 50 MPa/m 0,05 0,001
Ruszt (płyta): – moduł Younga E_s – zastępcza gęstość β_{gr} – współczynnik Poissona ν_s – bezwładnościowy współczynnik tłumienia α_p – sztywnościowy współczynnik tłumienia β_p	210 GPa 1105 kg/m ³ 0,3 0,01 0,005

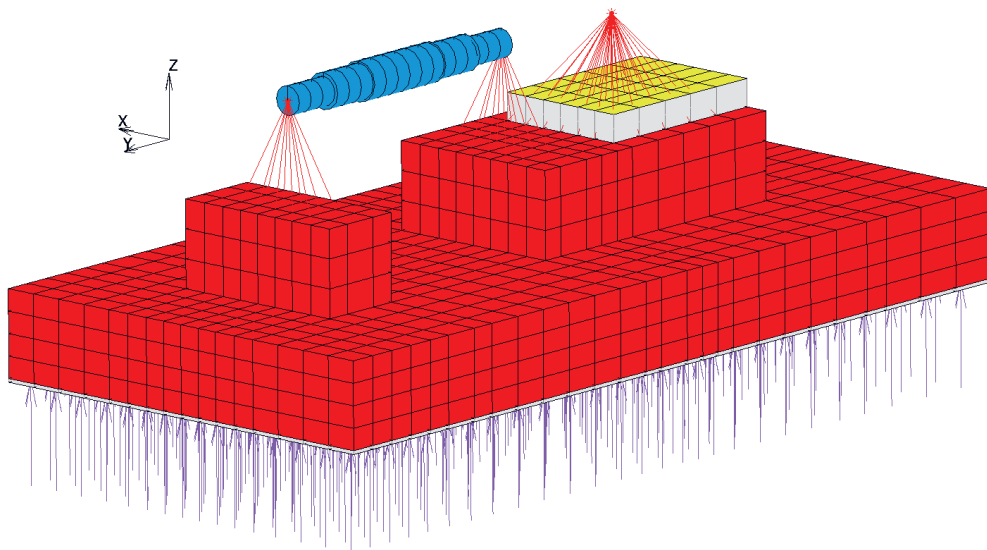
Na rysunku 6 pokazano fragment modelu MES z przypisanymi własnościami materiałowymi.



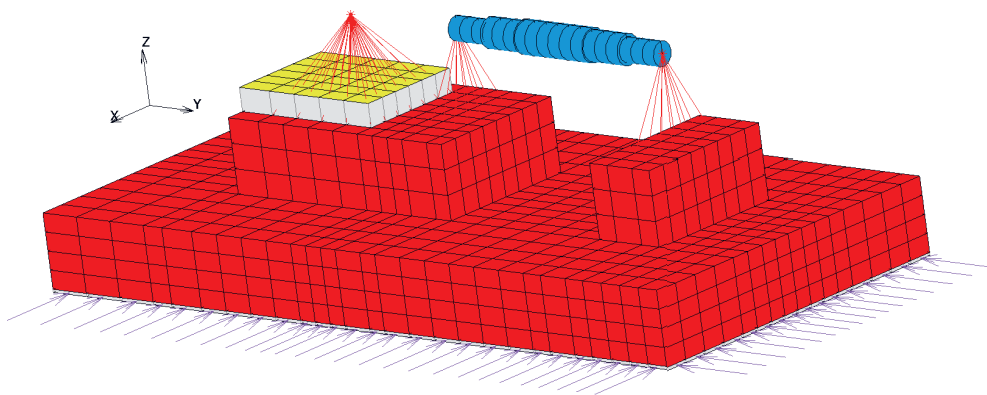
Rys. 6. Przypisane materiały do elementów modelu MES

2.3. KINEMATYCZNE WARUNKI BRZEGOWE

W przypadku fundamentów blokowych warunki brzegowe obejmowały jedynie sprężyste podparcie bryły wynikające ze swobodnego pionowego nacisku podstawy fundamentu na grunt. Z tego nacisku wynikają przyjmowane w literaturze współczynniki sprężystości. Na podstawie normy przyjęto powierzchniowy współczynnik sprężystości pionowej $C_z = 50 \text{ MPa/m}$ (rys. 7) oraz powierzchniowy współczynnik sprężystości poziomej $C_x = 0,7 C_z$ (rys. 8) [3, 4].



Rys. 7. Pionowa sprężystość podparcia wynikająca z właściwości gruntu



Rys. 8. Pozioma sprężystość podparcia wynikająca z właściwości gruntu

2.4. OBCIĄŻENIA STATYCZNE

W modelu analizowano stan konstrukcji pochodzących od obciążeń statycznych. W przypadku fundamentów pod maszyny obciążenia te wynikają jedynie z obecności mas, są to więc obciążenia grawitacyjne. Celem analizy było określenie naprężeń na gruncie, a przede wszystkim określenie przemieszczeń statycznych (trwałych) płyty fundamentu. Równomierne translacyjne statyczne przemieszczenie płyty fundamentu pod obciążeniem grawitacyjnym świadczy o poprawnym rozmieszczeniu mas – środek ciężkości układu mas powinien bowiem przechodzić w przybliżeniu przez środek geometryczny podstawy fundamentu.

2.5. OBCIĄŻENIA DYNAMICZNE

W przypadku fundamentów pod dmuchawy ciągu spalin siły wzbudzające pochodzą od niewyważonych wirujących części maszyn. W analizowanej konstrukcji częściami tymi były wał wraz z wirnikiem dmuchawy oraz wirnik silnika elektrycznego. Przyjęto, że wirnik dmuchawy był osadzony w środku rozpiętości długiego wału – między innymi dlatego masę wirnika zamodelowano jako masę skupioną, przypisując dodatkowo temu punktowi tensor bezwładności opisujący przestrzenną bezwładność wirnika dmuchawy. Taki sposób modelowania jest wystarczający, gdy celem jest wyznaczenie oddziaływań wirującego wału i dmuchawy na fundament (przez łożyska). Stąd też siły dynamiczne mogą być modelowane jako wirująca siła odśrodkowa zaczepiona na osi wału w środku jego rozpiętości. Inne podejście zastosowano w odniesieniu do wirnika silnika – w tym przypadku nie modelowano wału silnika, ponieważ przyjęto, że: wał wraz z wirnikiem jest względnie krótki i sztywny, korpus silnika (wraz ze stojanem) stanowi bryłę sztywną, a środek masy całego silnika leży na osi wału w środku jego rozpiętości. Reakcje z łożysk wału silnika przenoszą się przez sztywny korpus równomiernie na powierzchnię rusztu stalowego kotwionego w postumencie nr 1 fundamentu.

Amplitudę sił bezwładności dmuchawy określono wzorem:

$$P_d = (m_{wd} + m_d) \cdot e_d \cdot \vartheta^2 \quad (1)$$

a w przypadku silnika:

$$P_s = m_{ws} \cdot e_s \cdot \vartheta^2 \quad (2)$$

gdzie: $\vartheta = \pi \cdot n/30$ rad/s, $m_{wd} = 6,08t$, $m_d = 4t$, $m_{ws} = 4,4t$.

W analizowanym przykładzie dmuchawy ciągu spalin eksploatacyjne obroty silnika wynosiły $n = 900$ obr/min, co odpowiada częstotliwości $f = 15$ Hz. W rzeczywistych warunkach podczas pracy obroty silnika mogą wahać się w zakresie 840–960 obr/min, tj. w przedziale $f = 14$ –16 Hz. Przytoczone wartości są kluczowe, ponieważ częstotliwości własne fundamentu powinny leżeć poza tym przedziałem, inaczej mogłoby dojść do rezonansu.

Równanie macierzowe ruchu drgań ustalonych analizowane w pracy można przedstawić następująco [5, 6]:

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{x}} + \mathbf{C}\dot{\mathbf{x}} + \mathbf{K}\mathbf{x} = \mathbf{P}_d \cdot \cos \vartheta t + \mathbf{P}_d \cdot \sin \vartheta t + \mathbf{P}_s \cdot \cos \vartheta t + \mathbf{P}_s \cdot \sin \vartheta t = \mathbf{P}_1 \cdot \cos \vartheta t + \mathbf{P}_2 \cdot \cos \vartheta t \quad (3)$$

gdzie:

$\mathbf{M}_{N \times N}$ – globalna macierz bezwładności,

$\mathbf{K}_{N \times N}$ – globalna macierz sztywności,

$\mathbf{C}_{N \times N}$ – globalna macierz tłumienia,

$\mathbf{P}_d$ – wektor obciążenia węzła w środku rozpiętości wału dmuchawy,

$\mathbf{P}_s$ – wektor obciążenia węzła w środku ciężkości silnika,

$\mathbf{P}_1 = \mathbf{P}_d + \mathbf{P}_s \cdot (\cos \varphi - \sin \varphi)$, $\mathbf{P}_2 = \mathbf{P}_d + \mathbf{P}_s \cdot (\cos \varphi + \sin \varphi)$,

φ – kąt fazowy przesunięcia składowych sił pochodzących od silnika w stosunku do sił pochodzących od dmuchawy,

$\mathbf{x} = \mathbf{x}(t)$ – wektor przemieszczeń węzłów modelu w czasie.

Przy założeniu, że analizie będzie poddana jedynie odpowiedź ustalona, otrzymamy:

$$\mathbf{x}(t) = \mathbf{x}_1 \cdot \sin \vartheta t + \mathbf{x}_2 \cdot \cos \vartheta t \quad (4)$$

co prowadzi do związku na amplitudy drgań:

$$\begin{bmatrix} -\vartheta^2 \mathbf{M} + \mathbf{K} & -\vartheta \mathbf{C} \\ \vartheta \mathbf{C} & -\vartheta^2 \mathbf{M} + \mathbf{K} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{x}_1 \\ \mathbf{x}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{P}_1 \\ \mathbf{P}_2 \end{bmatrix} \quad (5)$$

Jak widać ze struktury macierzy w równaniu (5), zjawisko rezonansu wystąpi, gdy częstotliwość drgań wymuszających ϑ jest zbliżona do częstotliwości drgań własnych konstrukcji ω . W rezultacie konstrukcja zaczyna drgać z dużymi amplitudami tłumionymi, jednak ze względnie dużym tłumieniem gruntu.

2.6. DRGANIA WŁASNE

Drgania własne konstrukcji to jej możliwy ruch bez udziału sił zewnętrznych – ruch ten jest wyłącznie skutkiem cech dynamicznych samej konstrukcji. Analiza takiego ruchu jest podstawową powinnością inżyniera. Te drgania są rezultatem oddziaływań sił wewnątrz struktury, takich jak siły sprężystości, siły tłumienia i innych czynników związanych z elastycznością i właściwościami materiałów.

Drgania własne w konstrukcji zależą od następujących czynników [2, 6]:

- masy – masa konstrukcji ma bezpośredni wpływ na drgania własne; im większa masa, tym niższe częstotliwości drgań własnych;
- sztywności – sztywność struktury określa jej zdolność do zachowania kształtu pod wpływem sił zewnętrznych; wyższa sztywność zwykle prowadzi do wyższych częstotliwości drgań własnych;
- rodzaju materiału – elastyczne właściwości materiału, z którego wykonana jest konstrukcja, wpływają na drgania własne, materiały o różnych modułach Younga czy współczynnikach tłumienia będą miały różne charakterystyki sztywnościowo-dyssypatywne;
- geometrii – geometria konstrukcji, w tym jej kształt i rozkład masy, ma istotny wpływ na drgania własne;
- warunków brzegowych – czyli podparcia, tzn. połączenia z innymi elementami lub w tym przypadku z gruntem;
- więzów wewnętrznych, tj. połączeń pomiędzy poszczególnymi częściami konstrukcji, na przykład przegubami.

Zrozumienie drgań własnych jest istotne dla zapewnienia stabilności i bezpieczeństwa konstrukcji, zwłaszcza w przypadku wystąpienia dynamicznych obciążeń, takich jak wiatr, trzęsienia ziemi czy ruch pojazdów. Analiza drgań własnych pozwala projektować konstrukcje tak, aby unikać rezonansu, który może prowadzić do uszkodzeń lub zawalenia się struktury. Równanie macierzowe drgań własnych bez tłumienia jest postaci [5, 6]:

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{x}} + \mathbf{K}\mathbf{x} = 0 \quad (6)$$

Jak widać, po prawej stronie równania siły są zerowe. Ostatecznie prowadzi to do zagadnienia własnego:

$$(-\omega^2 \mathbf{M} + \mathbf{K})\mathbf{V} = 0 \quad (7)$$

gdzie:

ω – częstość kołowa drgań własnych [rad/s],

$\mathbf{V}$ – wektory drgań własnych (postacie).

Znajomość kształtu postaci jest niezbędna do ułożenia najbardziej niekorzystnych kombinacji obciążeń dynamicznych [2, 6].

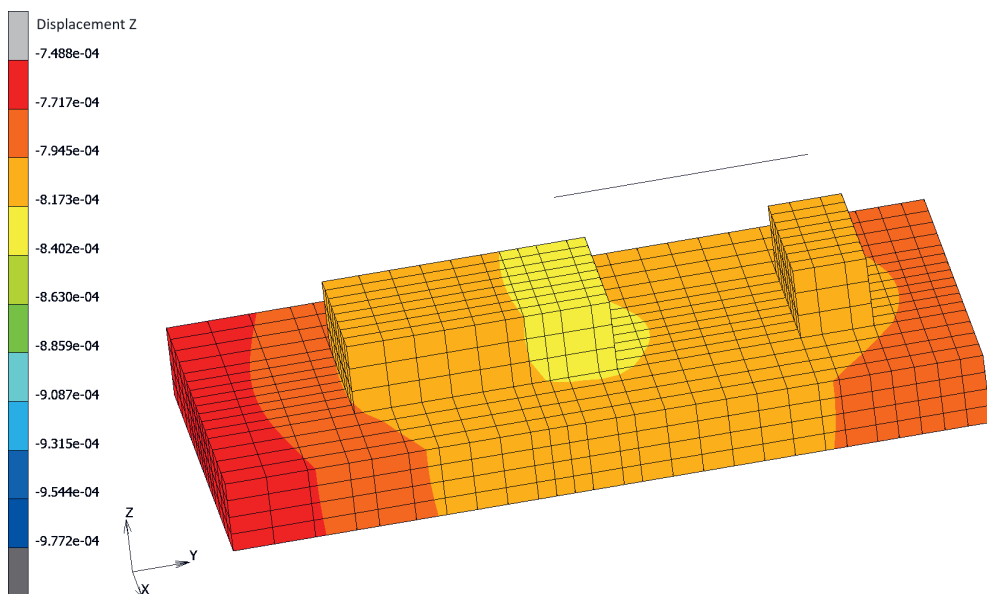
3. WYNIKI

W rozdziale tym zaprezentowano wyniki dotyczące odpowiedzi fundamentu na obciążenia grawitacyjne i dynamiczne [7]. Zwrócono uwagę na poprawność zamodelowania fundamentu dla powyższych obciążeń oraz porównano otrzymane wyniki z wartościami normowymi.

3.1. OBCIĄŻENIE GRAWITACYJNE

Jako pierwsze wykonano obliczenia osiadań pod wpływem ciężaru własnego.

Na rysunku 9 przedstawiono przemieszczenia pionowe fundamentu – widać, że płyta fundamentu osiada równomiernie, wartości osiadań nie przekraczają 0,8 mm, a różnica osiadań końców płyty nie przekracza 0,05 mm.



Rys. 9. Przemieszczenia pionowe spowodowane ciężarem własnym

3.2. CZĘSTOTLIWOŚCI I POSTACIE DRGAŃ WŁASNYCH

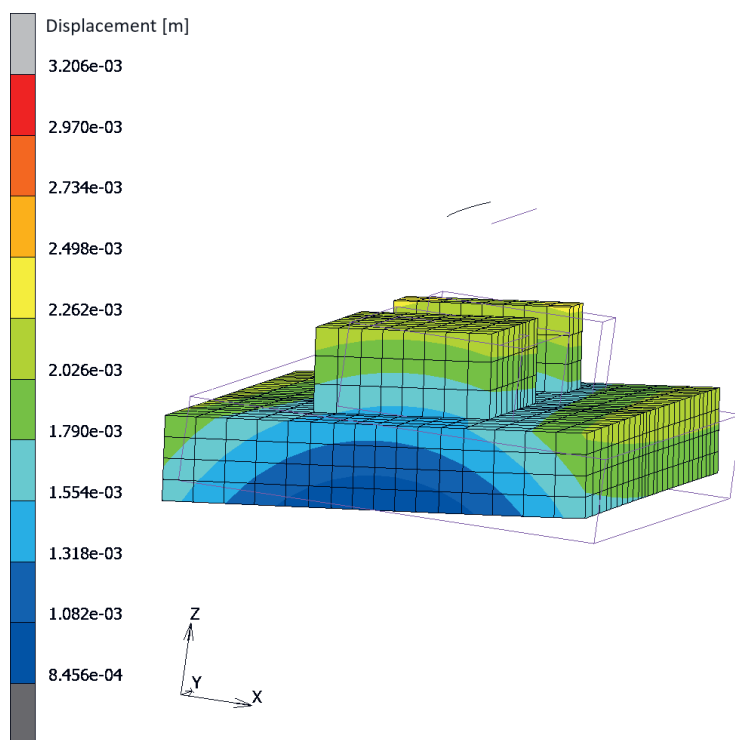
Na kolejnym etapie obliczono częstotliwości drgań własnych.

W tabeli 3 zestawiono częstotliwości drgań własnych wraz z opisem. Na rysunkach 10–15 przedstawiono kształty postaci drgań.

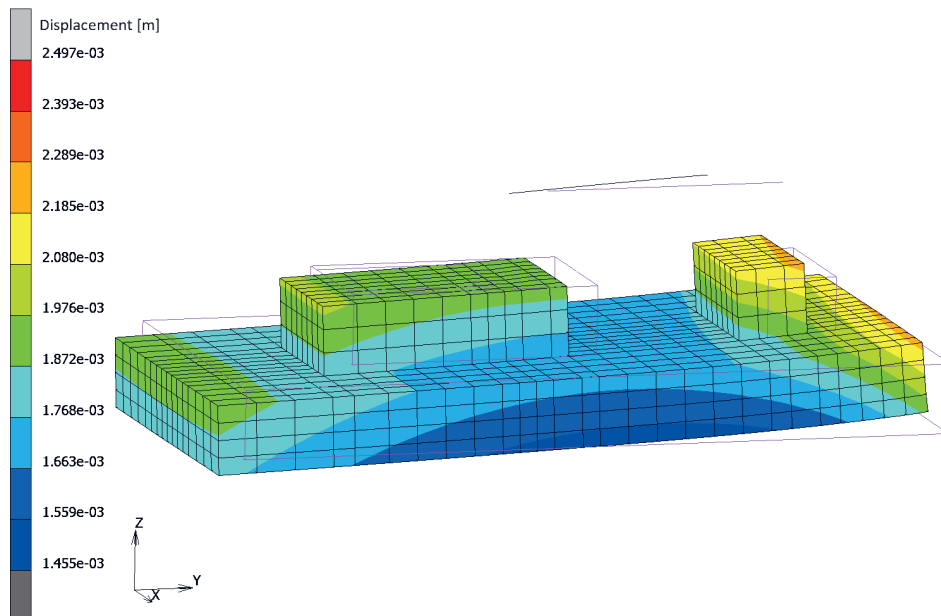
Tabela 3. Częstotliwości drgań własnych

Numer postaci drgań własnych	Częstotliwość drgań [Hz]	Opis
1	11,27	obrót fundamentu względem osi Y w płaszczyźnie postawy fundamentu
2	12,76	translacja wzdłuż osi Y z przechylem fundamentu
3	15,29	obrót fundamentu w płaszczyźnie XY
4	17,53	translacja wzdłuż osi Z
5	18,96	obrót w płaszczyźnie YZ
6	20,30	obrót fundamentu względem osi Y

Freq: 1.127e+01 [Hz]

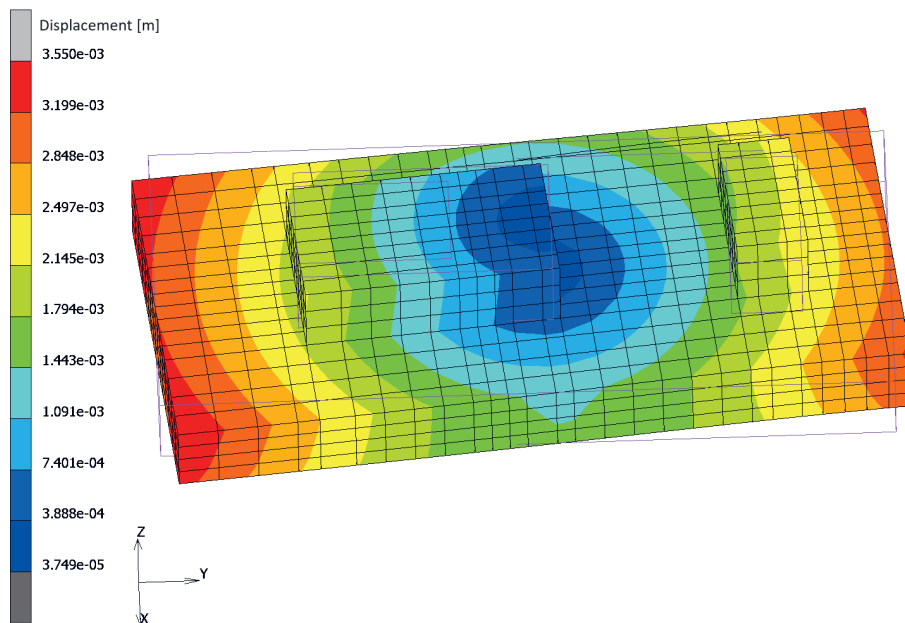
**Rys. 10.** Pierwsza postać drgań własnych

Freq: 1.276e+01[Hz]

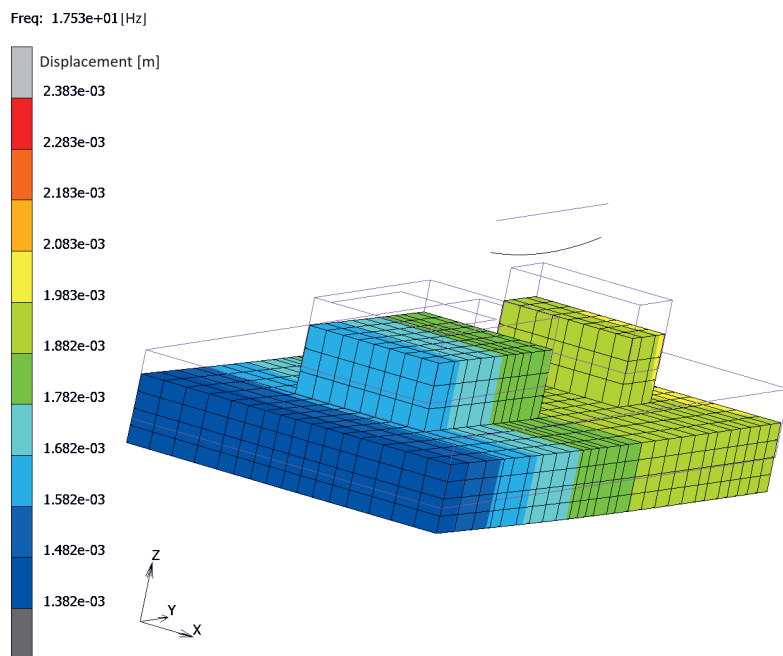


Rys. 11. Druga postać drgań własnych

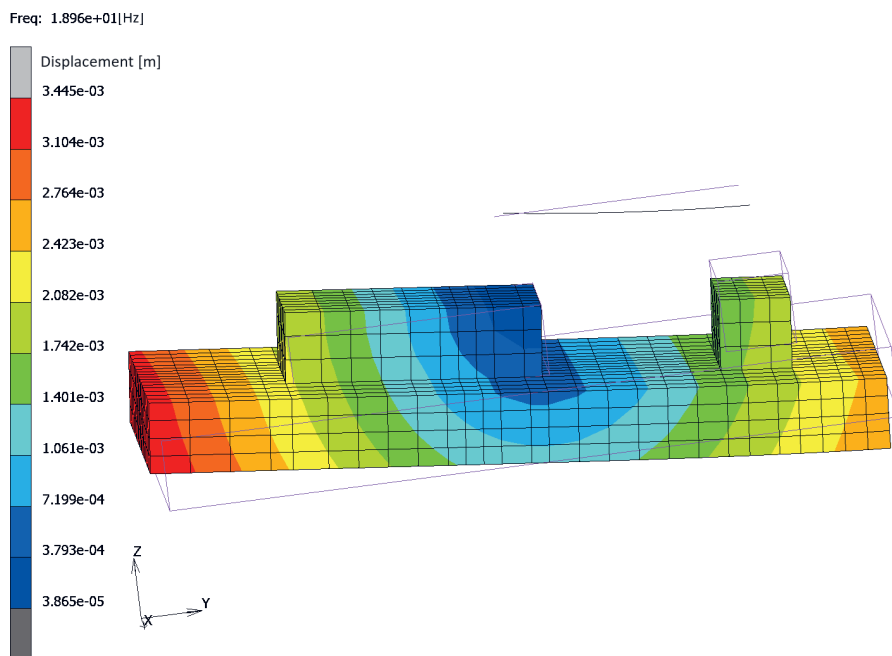
Freq: 1.529e+01[Hz]



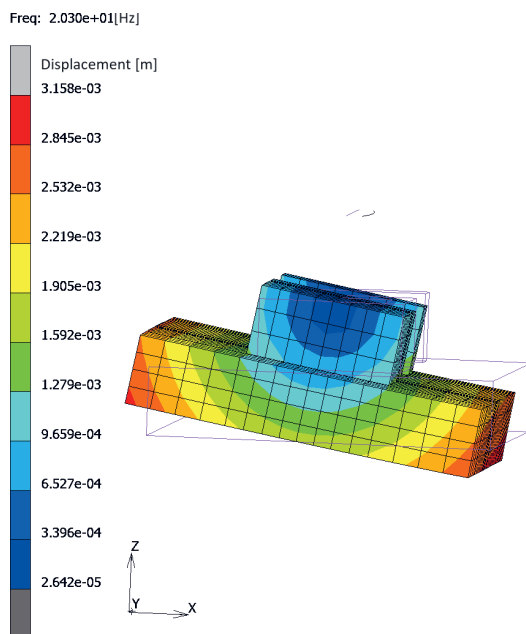
Rys. 12. Trzecia postać drgań własnych



Rys. 13. Czwarta postać drgań własnych



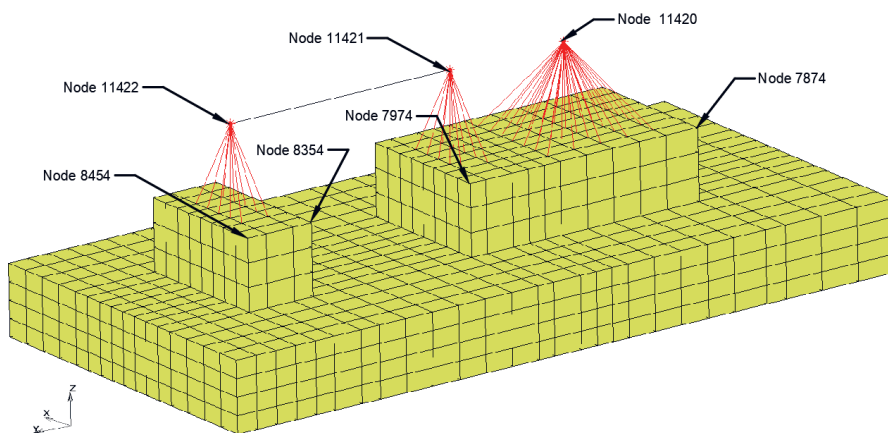
Rys. 14. Piąta postać drgań własnych



Rys. 15. Szósta postać drgań własnych

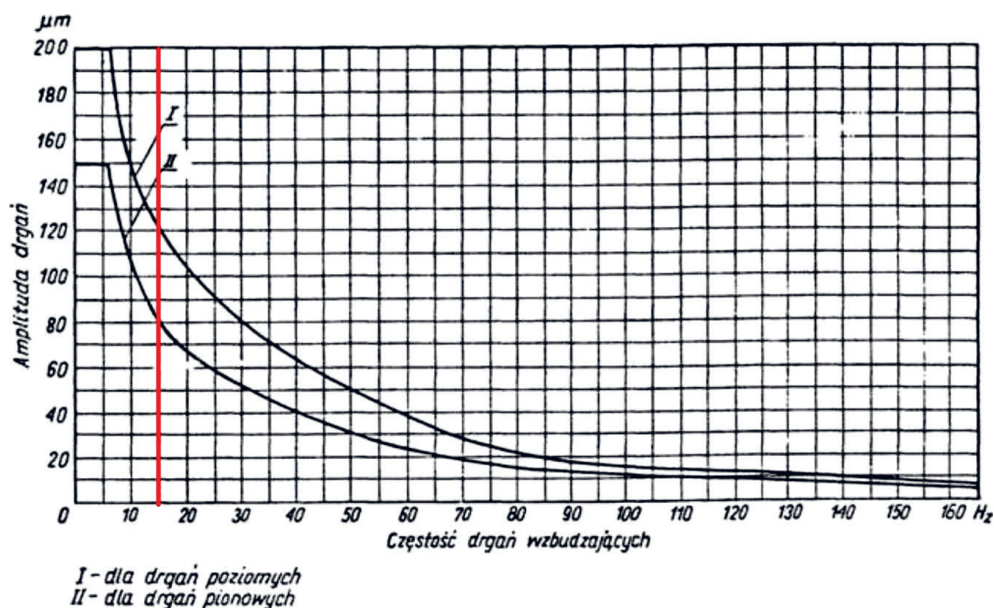
3.3. AMPLITUDY DRGAŃ USTALONYCH

W celu ustalenia amplitud drgań wyznaczono najbardziej niekorzystne kombinacje sił wymuszających pionowych i poziomych, których punkty zaczepienia umiejscowiono na wale silnika oraz wirniku dmuchawy. Ich dokładną lokalizację oraz relacje fazowe między nimi ilustrują kolejne rysunki. Amplitudy drgań badano w wybranych węzłach MES modelu fundamentu przedstawionych na rysunku 16.



Rys. 16. Wybrane węzły, w których wyznaczono amplitudy drgań

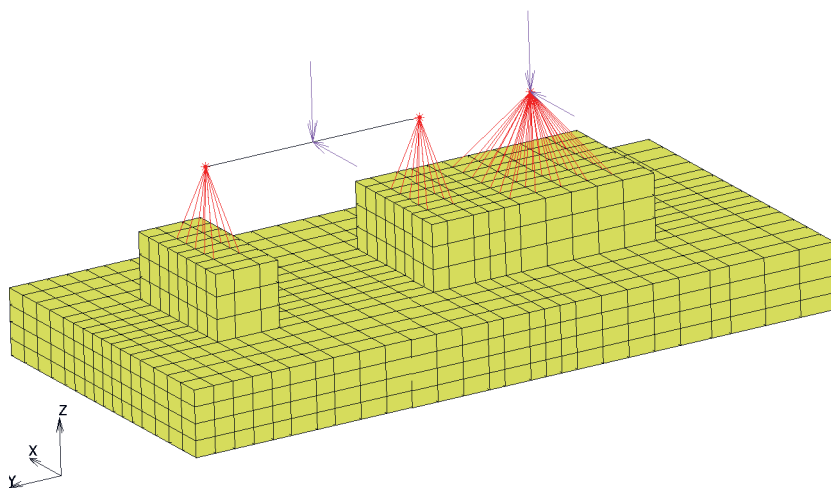
W pokazanych węzłach fundamentu sporządzono wykresy zależności amplitud całkowitych przemieszczeń funkcji częstotliwości wymuszenia (obrotów wału). Każdej kombinacji sił wymuszających odpowiada jeden wykres ilustrujący zależność amplitudy przemieszczeń od częstotliwości. Amplitudy drgań będą porównywane z wykresem (rys. 17) ilustrującym ich dopuszczalne wartości ze względu na użytkowanie maszyny [3].



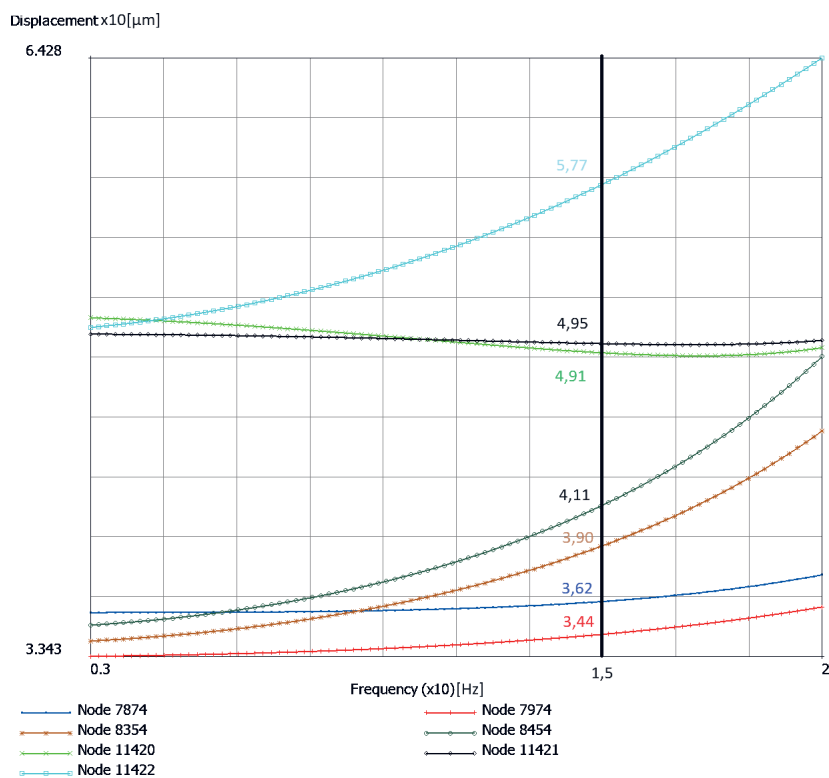
Rys. 17. Wykres dopuszczalnych (największych) amplitud drgań wymuszonych ze względu na użytkowanie maszyny

Źródło: [3]

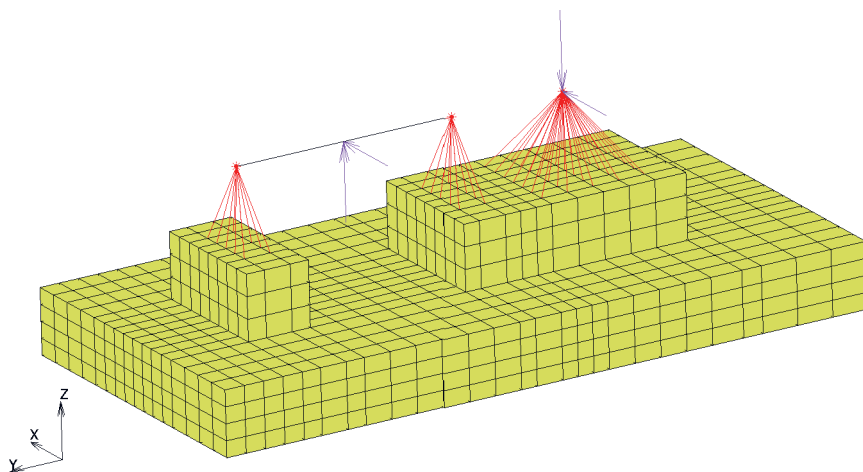
Podstawą definicji najbardziej niekorzystnych układów obciążeń wymuszających jest wnikliwa obserwacja kształtu postaci drgań. W niniejszej pracy skupiono się na częstościach drgań własnych związanych z drganiami fundamentu jako bryły sztywnej. Zdefiniowano więc układ obciążeń odwzorowujący maksymalne obciążenia pionowe (rys. 18 i 19) oraz maksymalne obroty podstawy fundamentu (rys. 20 i 21). Na kolejnych rysunkach (rys. 22–25) przedstawiono kombinacje obciążeń działających na wał i silnik oraz wyliczone dla nich całkowite amplitudy przemieszczeń w zakresie częstotliwości wymuszenia od 3 Hz do 20 Hz. Na rysunkach z wynikami zaznaczono pionową linią częstotliwość 15 Hz, co odpowiada eksploatacyjnej prędkości obrotowej 900 obr/min.



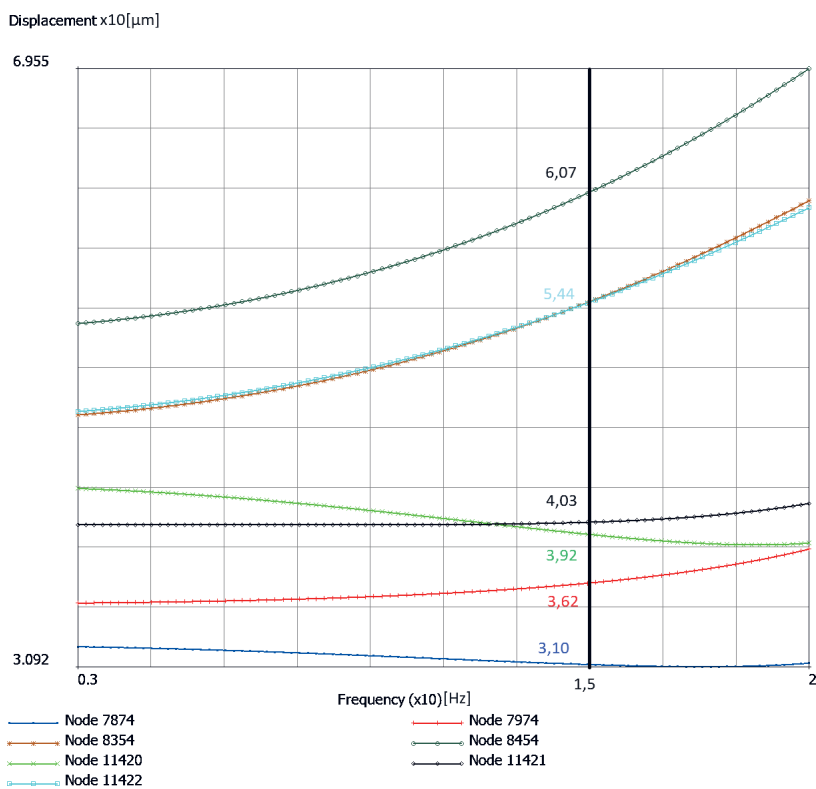
Rys. 18. Pierwsza kombinacja sił wymuszających



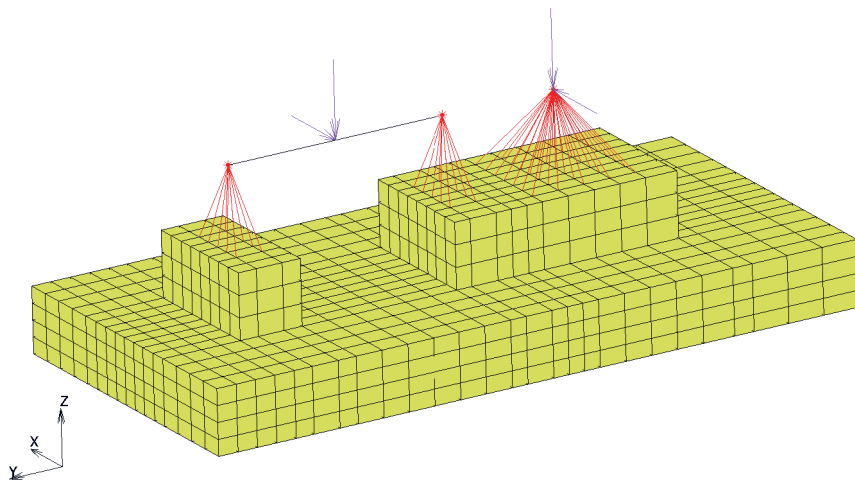
Rys. 19. Wykres całkowitych amplitud przemieszczeń odpowiadający pierwszej kombinacji sił wymuszających



Rys. 20. Druga kombinacja sił wymuszających



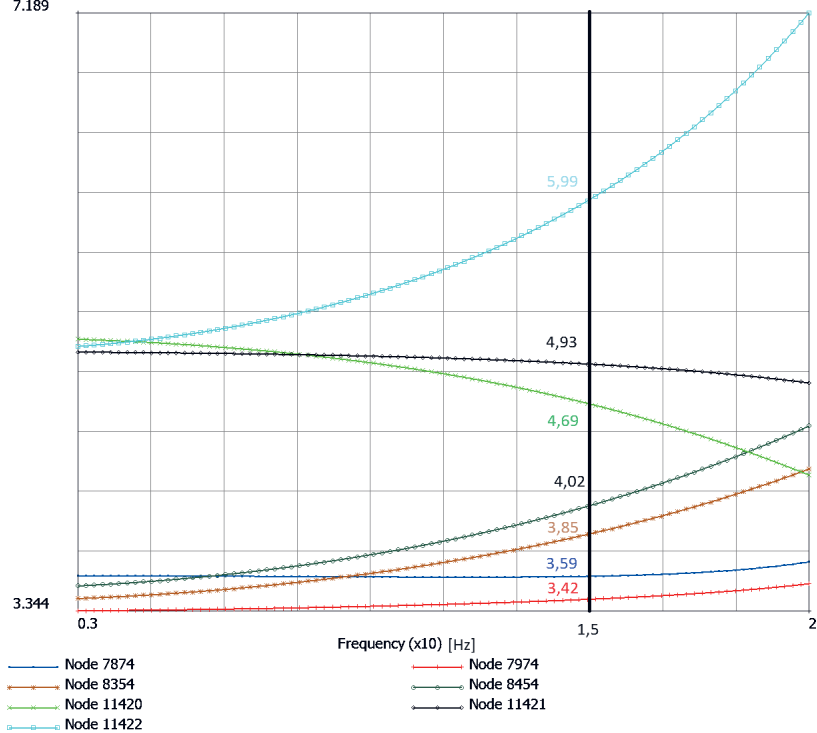
Rys. 21. Wykres całkowitych amplitud przemieszczeń odpowiadający drugiej kombinacji sił wymuszających



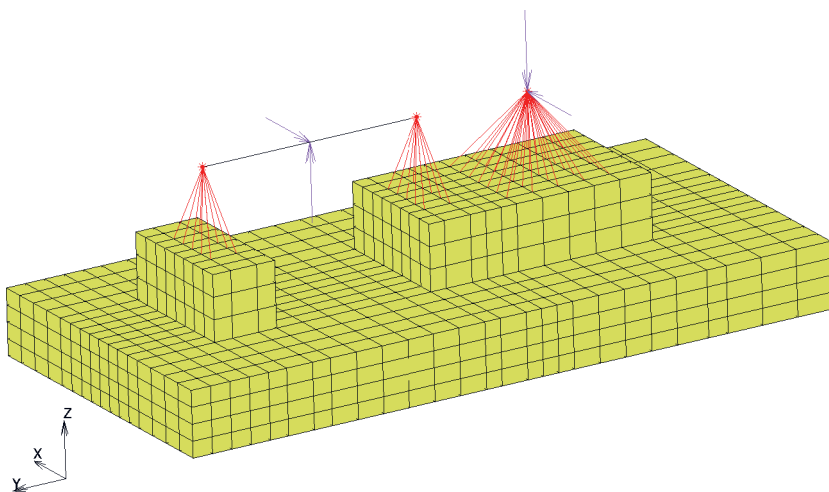
Rys. 22. Trzecia kombinacja sił wymuszających

Displacement x10[μm]

7.189

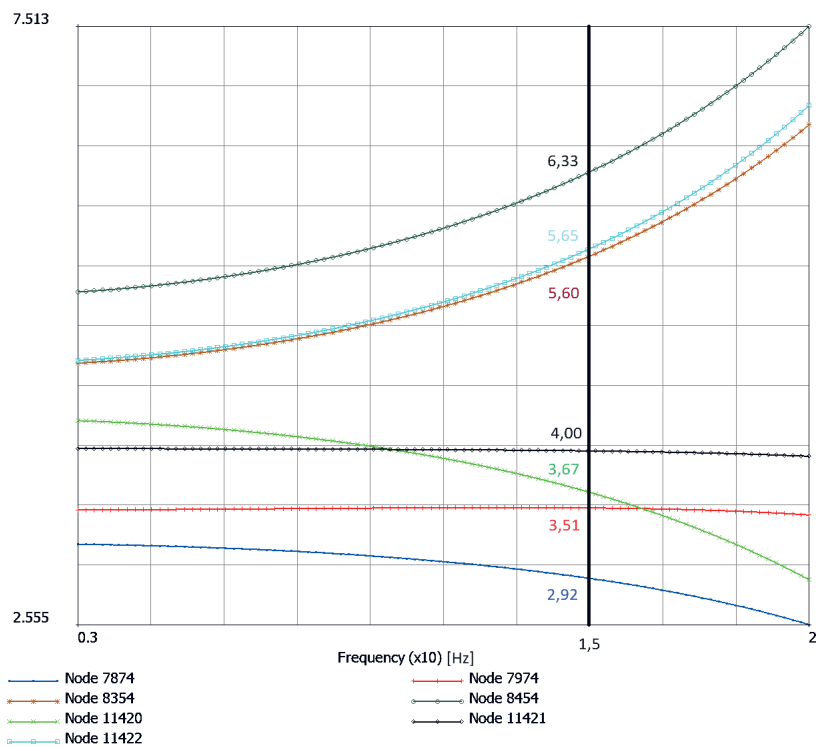


Rys. 23. Wykres całkowitych amplitud przemieszczeń odpowiadający trzeciej kombinacji sił wymuszających



Rys. 24. Czwarta kombinacja sił wymuszających

Displacement x10 [μm]



Rys. 25. Wykres całkowitych amplitud przemieszczeń odpowiadający czwartej kombinacji sił wymuszających

4. WNIOSKI

W pracy zamodelowano fundament blokowy pod dmuchawę ciągu spalin. Zastosowano metodę elementów skończonych. W modelu odwzorowano najistotniejsze elementy konstrukcji wpływające na jej zachowanie dynamiczne. Analiza wyników od obciążeń stałych potwierdziła, że środek ciężkości fundamentu leży nad środkiem podstawy fundamentu.

Wyznaczono częstotliwości drgań własnych fundamentu jako bryły sztywnej na sprężystym podłożu. Częstotliwości te leżały w zakresie 11,27–20,30 Hz, a zatem obejmowały eksploatacyjną częstotliwość wzbudzenia równą około 15 Hz. Należało więc sprawdzić amplitudy drgań wybranych węzłów modelu. By sprawdzić, czy konstrukcja spełnia wymagania normowe, ułożono cztery najbardziej niekorzystne kombinacje obciążeń dynamicznych, przy uwzględnieniu postaci drgań. Otrzymane wyniki pokazują, że maksymalna amplituda drgań elementów konstrukcyjnych przy częstotliwości eksploatacyjnej wynosi 63,3 μm , co jest wartością mniejszą niż dopuszczalna 80 μm określona normą [3].

LITERATURA

- [1] ARX Structures, <https://arx-structures.com>.
- [2] Kłóś C., Lipiński J., *Fundamenty pod maszyny*, Wydawnictwo Arkady, Warszawa 1959.
- [3] PN-80/B-03040, *Fundamenty i konstrukcje wsporcze pod maszyny*.
- [4] Ciurej H., Tatara T., *Analiza dynamiczna pracy układu wentylatora ciągu spalin – blok energetyczny*, Czasopismo Techniczne – Budownictwo, 11-B, 2004, s. 11–20.
- [5] Nizioł J., *Metodyka rozwiązywania zadań z mechaniki*, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa 2002.
- [6] Kruszewski J., Sawiak S., Wittbrodt E., *Metoda sztywnych elementów skończonych w dynamice konstrukcji*, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa 1999.
- [7] Ambroziak A., Kłosowski P., *MSC.Marc/Mentat Przykłady obliczeń*, Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej, Gdańsk 2017.

Jan Udaliszczew*

ANALIZA EFEKTYWNOŚCI RÓŻNYCH RODZAJÓW ZIEM FILTRACYJNYCH W RAFINACJI PARAFINY NA PRZYKŁADZIE PRZEDSIĘBIORSTWA TERRA TRADE

Współczesna przemysłowa produkcja parafiny oraz innych produktów na bazie węglowodorów, takich jak oleje mineralne czy woski, jest niezwykle silnie związana z procesem oczyszczania surowców. Jednym z kluczowych etapów tego procesu jest filtracja parafiny, która ma na celu usunięcie zanieczyszczeń i substancji niepożądanych, które mogą wpłynąć na jakość i właściwości końcowego produktu. Ziemia filtracyjna odgrywa niezastąpioną rolę w procesie filtracji parafiny. W pracy przedstawiono główne aspekty związane z ziemią do filtracji parafiny, w tym jej właściwości fizyczne i chemiczne, procesy produkcji oraz zastosowanie w przemyśle. Celem pracy jest analiza efektywności rodzajów ziemi filtracyjnej pod kątem jakości gotowego surowca i przedstawienie innych metod oczyszczania parafiny. Praca ta stanowi kompleksowe spojrzenie na ziemię do filtracji parafiny oraz dostarcza niezbędnej wiedzy do zrozumienia jej kluczowej roli w procesie produkcyjnym.

ANALYSIS OF THE EFFECTIVENESS OF VARIOUS TYPES OF FILTER EARTHS FOR PARAFFIN REFINING ON THE EXAMPLE OF THE TERRA TRADE COMPANY

Modern industrial production of paraffin and other hydrocarbon-based products, such as mineral oils or waxes, is extremely closely related to the process of raw material purification. One of the key stages of this process is paraffin filtration, which aims to remove impurities and undesirable substances that may affect the quality and properties of the final product. Filter earth plays an irreplaceable role in the paraffin filtration process. The paper presents the main aspects related to soil for paraffin filtration, including its physical and chemical properties, production processes and use in industry. The aim of the work is to analyze the effectiveness of types of filter soil in terms of the quality of the finished raw material and to present other methods of paraffin purification. This work provides a comprehensive look at paraffin filtration soil and provides the necessary knowledge to understand its key role in the production process.

* AGH Akademia Górniczo-Hutnicza, Wydział Zarządzania, Koło Naukowe „Menadżer Produkcji”.

1. WSTĘP

Celem pracy jest analiza różnych rodzajów ziem bielących wykorzystanych w przedsiębiorstwie Terra Trade podczas procesu rafinacji parafiny pod kątem uzyskania najbardziej bezbarwnego produktu. Realizacja celu pracy polega na wykonaniu badań laboratoryjnych za pomocą różnych rodzajów ziem filtracyjnych oraz domieszkowania węgla aktywnego zgodnie ze standardowymi procedurami przeprowadzanymi w laboratorium przedsiębiorstwa.

Praca składa się z części teoretycznej oraz praktycznej. W części teoretycznej na podstawie literatury krajowej i zagranicznej opisano podstawowe pojęcia związane z procesem produkcji parafiny, przedstawiono jej właściwości fizyczne i sposoby jej pozyskiwania. Ponadto szczegółowo opisano jej zastosowanie oraz etapy rafinacji na przykładzie analizowanego przedsiębiorstwa. W części badawczej wykonano badania laboratoryjne dotyczące możliwości pozyskania jak najlepszej jakościowo parafiny na podstawie przyjętych założeń dla różnych etapów procesu jej rafinacji. Badania prowadzone były z wykorzystaniem aktualnie obowiązujących norm i dokumentacji technicznej.

2. PARAFINA

Parafina jest to mieszanina stałych węglowodorów nasyconych otrzymywana w wyniku rafinacji ropy naftowej. Jest biała bądź bezbarwna, pozbawiona zapachu oraz smaku, w dotyku zostawia na skórze tłustą warstwę. Nie rozpuszcza się w wodzie ani alkoholu etylowym, natomiast rozpuszcza się m.in. w benzenie oraz heksanie. Parafinę rafinuje się wskutek procesów chemicznych, które odbarwiają materiał za pomocą absorbentów, oraz frakcjonuje przy użyciu destylacji i rekrytalizacji, otrzymując parafinę o różnych charakterystykach [1]. Konfiguracja chemiczna nadaje woskom parafinowym amorficzne właściwości oraz obojętność. Skutkuje to powstaniem nieaktywnych grup funkcyjnych, co wpływa na niereaktywność z substancjami zewnętrznymi [2]. W składzie parafiny nie ma aktywnych centrów reaktywnych, co sprawia, że substancja ta nie podlega łatwo zmianom chemicznym pod wpływem czynników zewnętrznych. Zdolność parafiny do niereagowania z substancjami zewnętrznymi sprawia, że staje się ona wyjątkowym materiałem w wielu zastosowaniach przemysłowych.

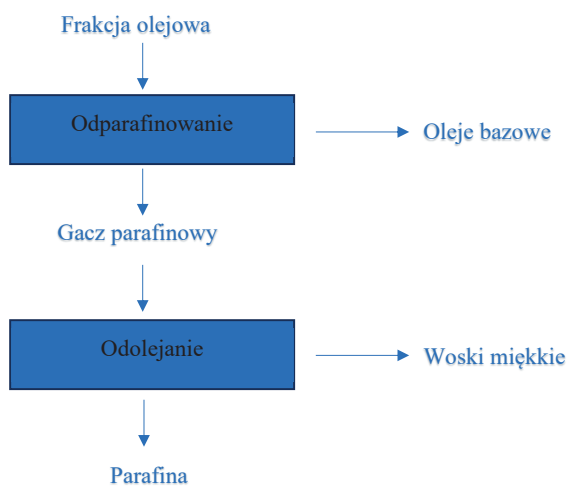
3. OTRZYMYWANIE PARAFINY

Produkcja parafin jest oparta na procesie odolejania gaczów parafinowych, który składa się z wielu etapów. W trakcie rafinacji ropy naftowej poza parafiną uzyskuje się wiele produktów ubocznych, takich jak oleje parafinowe czy gacze parafinowe. Są to materiały ropopochodne o innych charakterystykach i właściwościach fizykochemicznych, które znalazły zastosowania w innych sektorach gospodarki. W Polsce proces rafinacji parafiny ma ponad stuletnią tradycję. Przetwarzanie ropy wydobytej na terenie kraju o charakterze parafino-naftenowym przyczyniło się do rozwoju procesów ekstrakcji gaczów od frakcji olejowych, takich jak uzyskanie dwóch półwyrobów olejów oraz surowca do produkcji wosków parafinowych [3].

Obecnie w rafineriach nadal korzysta się przeważnie z ropy typu parafino-naftenowego, natomiast jest to produkcja seryjna na skalę masową i rocznie uzyskuje się ponad 60 tysięcy ton [4].

Proces otrzymywania parafiny

Na rysunku 1 przedstawiono schemat otrzymywania parafiny, z kolei na rysunku 2 przedstawiono granulę parafinową.



Rys. 1. Schemat otrzymywania parafiny

Źródło: [5]



Rys. 2. Granulat parafiny białej

Źródło: [6]

4. ZASTOSOWANIA PARAFINY

Przede wszystkim parafina jest stosowana do wytwarzania zniczy oraz świec, zarówno użytkowych, jak i dekoracyjnych. Jej właściwości doskonale współgrają z barwnikami oraz olejkami eterycznymi, dzięki czemu można uzyskać różnorodne kształty, kolory i zapachy, co sprawia, że świece stają się nie tylko źródłem światła, ale także estetycznym elementem dekoracyjnym. Ponadto parafina charakteryzuje się doskonałymi właściwościami fizykochemicznymi i zapewniającymi długi czas płonienia świec oraz zniczy [7–9]. Ze względu na różnorodne właściwości parafina znalazła szerokie zastosowanie w wielu dziedzinach życia codziennego. W branży kosmetycznej jest stosowana jako składnik np. szminek, balsamów, kremów czy pomad, zapewnia ochronną barierę dla skóry i ją nawilża [10, 11]. W medycynie parafina jest wykorzystywana w zabiegach terapeutycznych oraz chirurgicznych, zwłaszcza w terapii parafinowej mającej na celu łagodzenie dolegliwości reumatycznych oraz poprawę elastyczności stawów. W przemyśle spożywczym parafina odgrywa istotną rolę jako składnik powłok ochronnych nakładanych na owoce i warzywa. Naturalne, woskowate substancje nie tylko stanowią fizyczną barierę, ale także pełnią bardzo ważną funkcję związaną z regulacją atmosfery gazowej wokół produktów spożywczych. Ten istotny aspekt parafiny wpływa pozytywnie na procesy metaboliczne w produktach spożywczych, ograniczając procesy utleniania i zapewniając optymalne warunki przechowywania.

5. ZIEMIA BIELĄCA

Ziemie bielące to związki glinokrzemianowe o szerokim spektrum barw – od rudej po szarą. Występujące w przemyśle parafinowym w postaci bardzo miękkiego proszku. Przeważnie stosuje się ziemie na bazie diatomitu, czyli ziemi okrzemkowej. Taki surowiec podstawowy należy aktywować podczas obróbki termiczno-chemicznej, co skutkuje zwiększeniem porowatości ziemi, a w konsekwencji zwiększeniem powierzchni. Chemiczne aktywowanie ziemi to nasączenie wsadu kwasami takimi jak HCl lub H_2SO_4 , a następnie podgrzanie oraz wypłukanie rozpuszczalnika. Od efektywności, jaką charakteryzuje się ziemia, zależy wiele czynników, między innymi skład chemiczny, temperatura w procesie aktywowania czy czas działania kwasów [12]. Rozbudowanie struktury ziemi wpływa na jakość i efektywność oczyszczania surowców takich jak parafina, oleje roślinne, oleje bazowe czy gacze parafinowe.

6. RAFINACJA PARAFINY

Gacze parafinowe przechodzą proces przekształcania zorientowany na produkcję parafiny i mikrowosków. Proces obejmuje etapy odolejania i rafinacji produktów otrzymywanych z frakcji naftowych [4].

Rafinacja parafiny polega na oczyszczaniu surowców pochodzących z cyklu o obiegu zamkniętym, pozyskiwanych z odpadów przedsiębiorstw wytwarzających znicze lub świece, które nie spełniały norm, lub pochodzących bezpośrednio z procesu destylacji ropy naftowej. W przemyśle stosuje się dwie substancje adsorpcyjne do wybielania wosków: węgiel oraz ziemie bielące.

Surowiec poddany rafinacji należy wstępnie przygotować, ponieważ odpady wosków są pozyskiwane od producentów w formie stałej i zapakowane w kontenery warstwowo. Kontenery surowca rozpakowuje się, a następnie zasypuje do wanny grzewczej, gdzie roztopia się parafinę, po czym dokonuje się separacji kartonów, szkła czy wyprasek na tealighty zatopionych w odpadzie. Roztopiony surowiec trafia do zbiornika podgrzewanego z mieszalnikiem na dnie i zostaje zasypany odpowiednio dobraną ziemią bielącą lub węglem aktywnym w stosunku optymalnym uzyskanym w laboratorium. Przygotowana mieszanina jest podgrzewana do 110–120°C, a następnie mieszana. Po upływie odpowiedniego czasu zgodnego z technologią rafinacji mieszanina parafina-ziemia lub parafina-węgiel trafia na prasę, gdzie w wyniku filtracji oddzielany jest adsorbent od zrafinowanej parafiny.

Ten proces powtarza się parokrotnie w zależności od stopnia opłacalności i zadowolenia klienta. Zrafinowaną czystą parafinę granuluje, workuje i magazynuje na europaletach gotową do wysyłki do klienta.

7. PROGRAM BADAŃ

Program badań obejmował kontrolowany proces rafinacji parafiny, przeprowadzony w laboratorium przedsiębiorstwa z wykorzystaniem metodologii stosowanej w firmie. Polega on na zabarwieniu bezbarwnej próbki parafiny na dwa osobne kolory – zielony i czerwony – przy użyciu 0,1% pigmentów stosowanych w przemyśle świecowo-zniczowym. Zaaplikowano sześć rodzajów sorbentów do osobnych zlewek i przeprowadzono rafinację adsorpcyjną, powtórzono bielenie do momentu otrzymania surowca wyjściowego lub przerwano rafinację w przypadku, gdy stwierdzono brak efektywności adsorbentu. Gotowe próbki przedstawiono z podziałem na liczbę powtórzeń oraz rodzaj ziemi. W celu analizy ogólnej procesu i wstępnego wybrania optymalnego sorbentu dla barwnika.

Zgodność barw próbek porafinacyjnych z bazą (wyjściową parafiną) przedstawiono za pomocą programu GIMP w formie szesnastkowej notacji RGB (*red, green, blue*), stosowanej w kodowaniu HTML oraz przy określaniu kolorów za pomocą narzędzia *color picker* służącego do pobrania konkretnego koloru z grafiki. Próbki porównano w celu określenia optymalnego surowca rafinującego optycznie spośród przedstawionych.

Kolejnym etapem analizowanego zagadnienia jest zanieczyszczenie parafiny mieszaniną: 50% parafiny i 50% wosku palmowego oraz 0,1% barwnika zielonego i druga próbka 0,1% barwnika czerwonego. Zaproponowano takie badanie ze względu na oddanie kontekstu rzeczywistego próbek rafinowanych przez przedsiębiorstwo, gdyż odpady, które przedsiębiorstwo pozyskuje od producentów, posiadają wypełniacze w postaci smalców zwierzęcych, wosków palmowych lub wosków sojowych, co w znacznym stopniu obniża efektywność adsorpcyjną ziem oraz węgli. Zastosowanymi sorbentami są ziemia rafinacyjna, która dała najlepsze rezultaty, oraz węgiel aktywny. Domieszkowano mieszaniny sorbentami w ilości odpowiedniej do uzyskania przezroczystego surowca otrzymanego w poprzedniej próbie. Zastosowano również mieszaninę sorbentów w stosunku 4% ziemi bielącej i 2% węgla aktywnego, których proporcje zaczerpnięto z literatury [13].

Ostatnim etapem programu badań laboratoryjnych było przeprowadzenie rafinacji z wykorzystaniem wyników z poprzednich analiz i implementacja ich w kolejnych badaniach na próbce pochodzącej z produkcji o barwie trudnej do zrafinowania do koloru białego.

Analiza składów ziem została wykonana na podstawie badań udostępnionych przez przedsiębiorstwo pod kątem wyłonienia grupy składników chemicznych najlepiej adsorbujących barwniki w parafinie i kompozycjach parafinowych.

8. SKŁAD CHEMICZNY ZIEM BIELĄCYCH

W tabeli 1 przedstawiono składy chemiczne ziem bielących ustalone na podstawie analizy spektroskopowej.

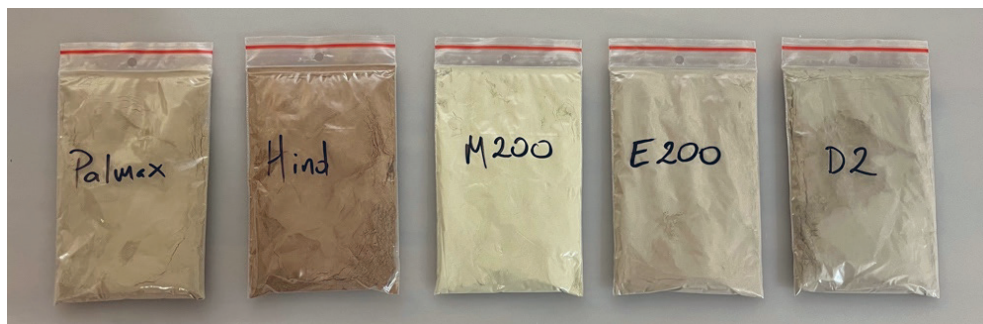
Tabela 1. Skład chemiczny ziem bielących uzyskany metodą spektroskopową

Związek chemiczny [%]	Ziemia bieląca				
	Palmax	M200	E200	D2	Galleon V2G
SiO ₂	59,94	64,8	53,7	53,4	58,26
Al ₂ O ₃	9,18	13,0	4,0	4,5	8,30
Fe ₂ O ₃	6,74	4,6	1,4	1,6	9,85
CaO	7,15	1,5	0,6	0,8	5,34
MgO	7,24	3,5	26,2	30,8	1,27
Na ₂ O	0,19	0,9	0,1	0,2	0,33
K ₂ O	0,99	2,8	0,8	1,0	0,65
SO ₄	2,57	–	–	–	–
TiO ₂	–	–	–	–	2,73
SO ₃	–	–	–	–	2,75

Źródło: [6]

W pracy przeanalizowano efektywności wybranych pięciu różnych rodzajów ziem bielących pochodzących z całego świata od różnych dostawców (rys. 3):

- Palmax – Holandia,
- Galleon V2G – Indie,
- M200 – Meksyk,
- E200 – Hiszpania,
- D2 – Hiszpania.



Rys. 3. Wybrane rodzaje ziem bielących. Objasnienia oznaczeń w tekście

Źródło: [6]

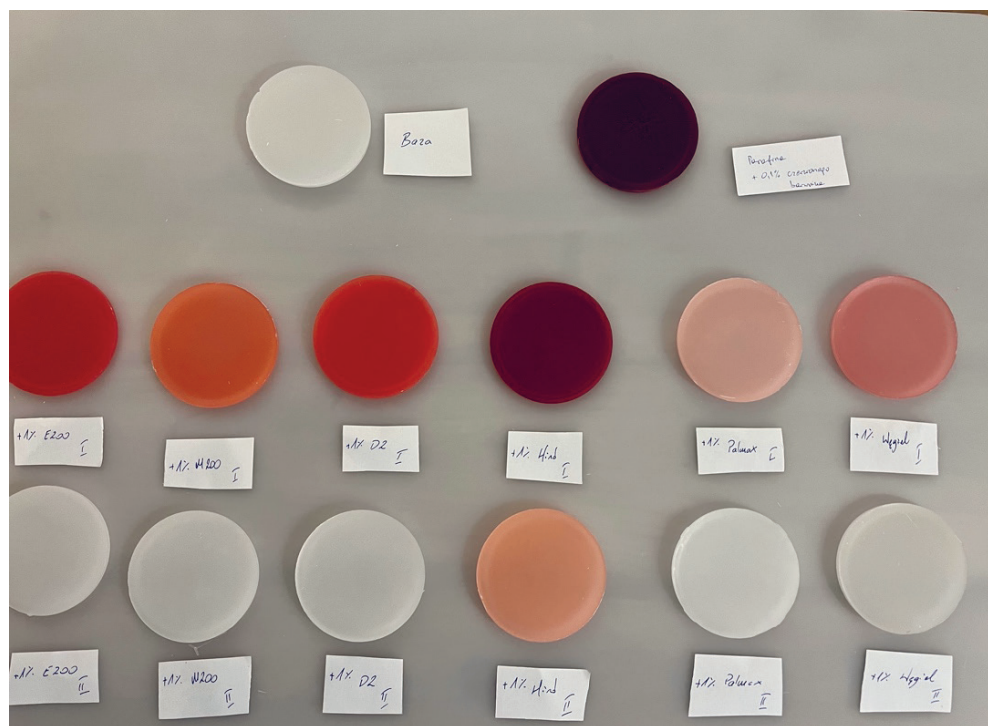
9. KOLEJNOŚĆ POSTĘPOWANIA

Poniżej opisano kolejność działań umożliwiających rafinację parafiny w laboratorium.

1. W pierwszej kolejności należy zasypać wielokrotność 100 g białej parafiny, na każdy badany rodzaj ziemi bielącej czy węgla aktywnego. Tak odmierzoną ilość do badania należy przesypać do zlewki o pojemności 1000 cm³. Tak przygotowaną zlewkę należy postawić na płycie grzewczej lub włożyć do suszarki przemysłowej w celu roztopienia surowca.
2. Odmierzenie wagą analityczną 0,5% (masy całkowitej roztopianej parafiny) barwnika odpowiedniej barwy, wsypanie barwnika do zlewki i zamieszanie bagietką w celu jego szybszej dyfuzji.
3. Po całkowitym roztopieniu należy przelać za pomocą wagi precyzyjnej po 100 g barwionej parafiny do zlewek – zlewkę umieszczamy na wadze, wagę tarujemy i z zachowaniem przepisów BHP przelewamy zawartość dużej zlewki. Przygotowane zlewki należy podpisać nazwą sorbentu.
4. Próbkę czekającą na swoją kolej rafinacji odkłada się do suszarki przemysłowej, aby zapobiec krzepnięciu.
5. Na wadze analitycznej należy odmierzyć po 1% odpowiedniego sorbentu, w tych badaniach podczas pierwszej rafinacji było to 1 g ziemi oraz węgla.
6. Przygotowany sorbent dodajemy do odpowiednio podpisanej zlewki.
7. Zlewkę odkładamy na mieszadło z płytą grzewczą ustawioną na odpowiednią moc, aby uzyskać temperaturę w zlewce oscylującą między 125–130°C, umieszczamy metalową kapsułkę mieszającą w zlewce i ustawiamy cykl 400 obrotów na minutę. Proces mieszania i podgrzewania powinien trwać 30 min, zatem ustawiony zegar na taki czas.
8. Po upływie 30 min ściągamy zlewkę z mieszadła i przez filtr do kawy przelewamy zawartość do następnej zlewki w celu oddzielenia rafinowanej parafiny od ziemi czy węgla. Tak przygotowaną zlewkę odkładamy do suszarki przemysłowej na czas filtracji.
9. Po zakończeniu filtracji należy wylać 20 g próbki na wieczko od puszki w celu zachowania parametrów optycznych danej rafinacji.
10. Powtarzać czynności od 4. kroku do momentu uzyskania satysfakcjonującego rezultatu lub zaniechania dalszych badań ze względu na brak wizualnych efektów rafinacji.

10. BADANIE WPŁYWU RÓŻNYCH RODZAJÓW ZIEM BIELĄCYCH NA RAFINACJĘ PARAFINY

W przypadku barwnika zielonego, aby otrzymać parafinę zbliżoną do koloru pierwotnego, należało powtórzyć proces rafinacji trzykrotnie, natomiast przy zastosowaniu barwnika czerwonego ten proces wymagał dwukrotnego powtórzenia. Wyniki badań przedstawiono na rysunku 4.

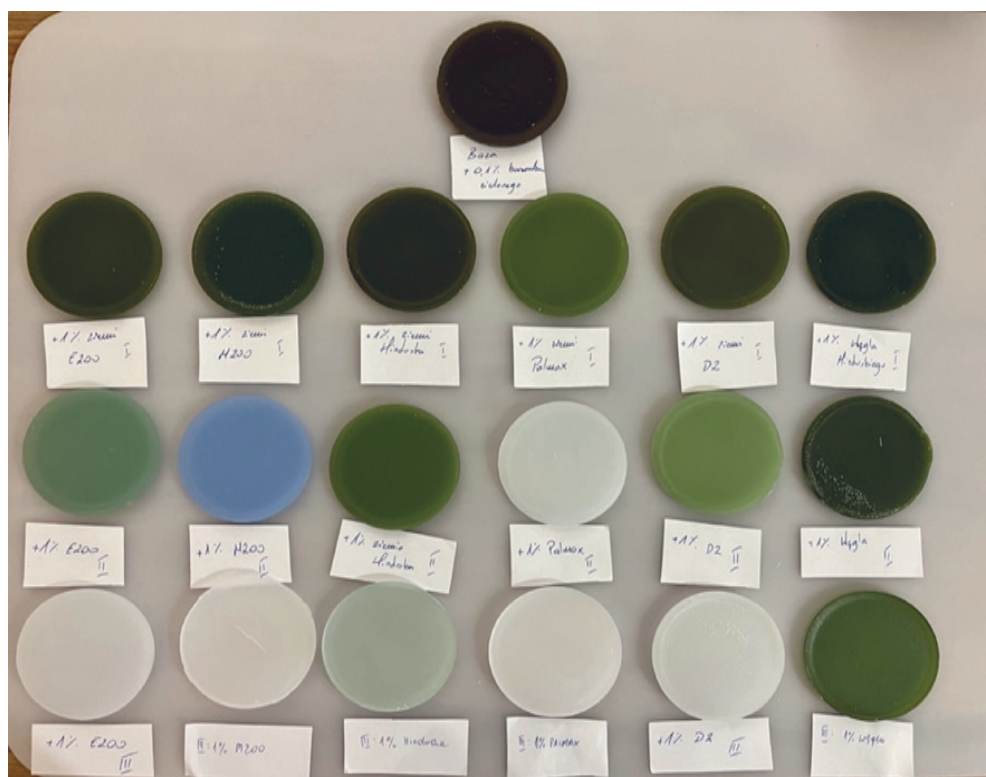


Rys. 4. Proces rafinacji czerwonego barwnika

W procesie rafinacji czerwonego barwnika najlepszy rezultat dała ziemia Palmax oraz D2, węgiel zostawił ciemniejszą poświatę, ziemie E200 oraz M200 również ładnie odbarwiły parafinę, pozostawiając lekką poświatę różowego. Ziemia Galleon V2G (hinduska) nie odbarwiła próbki w zadowalającym stopniu i zaniechano dalszego procesu rafinacji. Zakończono proces rafinacji po jej dwóch etapach, gdyż osiągnięte rezultaty są zadowalające dla przedsiębiorstwa (rys. 5).

Aby uzyskać barwę wyjściową, należało powtórzyć proces rafinacji jednokrotnie więcej w porównaniu z rafinacją przy użyciu barwnika czerwonego, co może wynikać z innych wiązań powstałych między parafiną a barwnikiem. Zaskakującym efektem, który otrzymano,

jest wybite się niebieskiego koloru podczas drugiej rafinacji ziemią M200. Najbardziej skuteczne ziemie to Palmax oraz M200. Ziemie D2 oraz E200 zostały lekką zieloną poświatą, natomiast ziemia Galleon V2G została ewidentną poświatą barwnika wyjściowego. Węgiel aktywny nie dał zadowalających rezultatów, zatem zaprzestano badania po wykonaniu trzech cykli rafinacji. Wyniki tej analizy przedstawiono w tabelach 2 i 3.



Rys. 5. Proces rafinacji zielonego barwnika

Tabela 2. Wyniki rafinacji barwnika czerwonego za pomocą kodu HTML

	Baza			Baza + barwnik		
	#D6D2C1			#380D14		
	Sorbent					
	E200	M200	Galleon V2G	Palmax	D2	Węgiel aktywny
Rafinacja I	#8E0E15	#9C3C32	#520005	#BA8989	#981A26	#9F5A57
Rafinacja II	#A69E91	#BCB7AC	#AF6C50	#D3CCC4	#C8C2B6	#C7C1B6

Tabela 3. Wyniki rafinacji barwnika zielonego za pomocą kodu HTML

	Baza			Baza + barwnik		
	#D6D2C1			#2A1F17		
	Sorbent					
	E200	M200	Galleon V2G	Palmax	D2	Węgiel aktywny
Rafinacja I	#2E310B	#242B14	#29280D	#424B20	#343411	#272A16
Rafinacja II	#58674A	#5A7494	#344118	#BABBA8	#5C6C3B	#2B321A
Rafinacja III	#C9BDAD	#D8CEBF	#949983	#E0D8CF	#D1D0C5	#435125

11. BADANIE WPŁYWU WOSKU PALMOWEGO NA RAFINACJĘ

Wprowadzenie wosków palmowych do procesu rafinacji parafiny może wiązać się z negatywnymi skutkami zarówno pod względem technologicznym, jak i jakościowym. Woski palmowe, będące mieszaniną trójglicerydów kwasów tłuszczowych, posiadają specyficzne właściwości chemiczne, które mogą utrudniać proces rafinacji parafiny. Przede wszystkim woski palmowe mogą zawierać inne związki chemiczne, które mogą wykazywać skłonność do utleniania się w obecności tlenu. To zjawisko może prowadzić do powstawania niepożądanych produktów, co z kolei wpływa negatywnie na stabilność chemiczną parafiny. Dodatkowo obecność wosków palmowych może skomplikować proces usuwania zanieczyszczeń i nieczystości. W zaproponowanym doświadczeniu zbadano wpływ wosku palmowego na proces rafinacji, rozrobiono mieszaninę 50% białej parafiny oraz 50% wosku palmowego również z wykorzystaniem tych samych dwóch rodzajów barwników firmy Bekro. W założeniach przyjęto, że wykorzystana zostanie ziemia Palmax, która wykazała najlepsze działanie w barwniku zielonym oraz czerwonym, a gramatura sorbentu będzie odpowiadała ilości użytej w poprzednim badaniu, która dała pożądany efekt rafinacji. Do rafinacji zielonego barwnika wykorzystane zostanie 3 g ziemi i węgla, a w przypadku barwnika czerwonego – 2 g ziemi i węgla. Przebadano również proporcję 4 g ziemi oraz 2 g węgla według składowych zaczerpniętych z literatury krajowej [13].

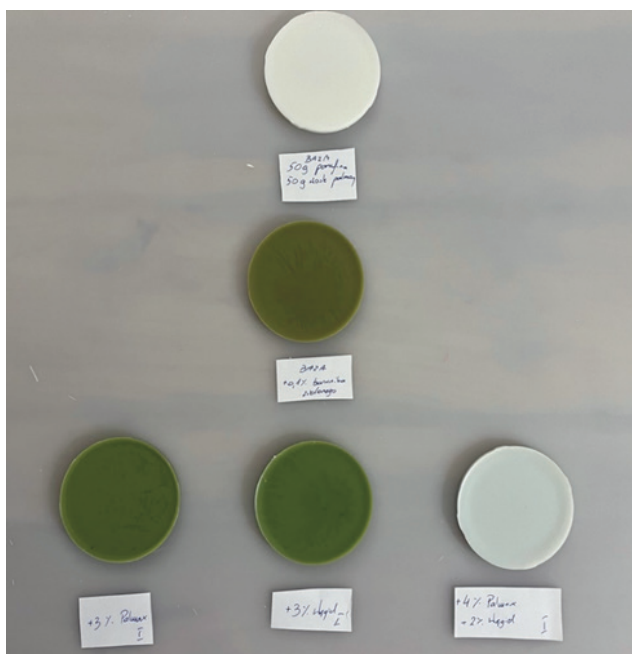
Podstawowe parametry wosku palmowego:

- temperatura krzepnięcia – 44°C,
- lepkość – 9,58 mm²/s w 100°C,
- penetracja – 9,0 mm.

Zauważono (rys. 6, 7), że parametry wosku palmowego zdecydowanie pogorszą parametry parafiny surowej, zwiększając jej penetrację i lepkość, natomiast obniżają temperaturę krzepnięcia. Wyniki tej analizy przedstawiono w tabelach 4 i 5.



Rys. 6. Badanie kompozycji z barwnikiem czerwonym



Rys. 7. Badanie kompozycji z barwnikiem zielonym

Tabela 4. Wyniki badań kompozycji parafinowej z barwnikiem czerwonym

Baza	#DAD7C1		
Baza + 0,1% barwnika	#6F0011		
Rafinacja	2% węgla	2% ziemi	4% ziemi 2% węgla
Wynik	#B1907D	#7E0F1E	#C1B8A9

Tabela 5. Wyniki badań kompozycji parafinowej z barwnikiem zielonym

Baza	#DAD7C1		
Baza + 0,1% barwnika	#4B481A		
Rafinacja	3% węgla	3% ziemi	4% ziemi 2% węgla
Wynik	#3F4C18	#3F4D1B	#BDC4BA

12. ANALIZA WYNIKÓW BADANIA WPŁYWU RÓŻNYCH RODZAJÓW ZIEM BIELĄCYCH NA EFEKTYWNOŚĆ PROCESU RAFINACJI PARAFINY

Analizując za pomocą programu komputerowego GIMP barwy uzyskane podczas procesu rafinacji, otrzymano wyniki wskazujące na to, że najbardziej zbliżonymi kodami do kodu próbki bazowej #D6D2C1 są:

- w procesie rafinacji czerwonego barwnika (odpowiednio):
 - #D3CCC4 – PALMAX,
 - #C8C2B6 – D2,
- w procesie rafinacji zielonego barwnika:
 - #D8CEBF – M200,
 - #E0D8CF – PALMAX.

Wyniki otrzymano na podstawie analizy minimalizowania oddalenia poszczególnych barw spektrum RGB od wyjściowej próbki. Analizowanymi zmiennymi w procesie rafinacji sorbentów była ich specyfikacja użytkowa przedstawiona w tabeli 1. Czynniki laboratoryjne mogące wpłynąć na wyniki badań, takie jak czas mieszania, temperatura procesu czy ilość parafiny oraz sorbentu, zostały wyeliminowane przez postępowanie zgodne z programem badań z zachowaniem szczególnej ostrożności. Rezultaty między różnymi rodzajami ziemi w badaniu rafinacji obydwu barwników nie odbiegały od siebie. Ziemie Palmax, D2, E200 i M200 dały podobne oraz zadowalające wyniki przy rafinacjach. Galleon V2G nie dał tak skutecznego efektu, jak inne analizowane sorbenty, gdyż dopiero przy czwartym nawrocie mógłby dać przeźroczystą parafinę. W przypadku badania tych próbek chemicznych można wysnuć wniosek, że substancje występujące tylko w ziemi Galleon V2G (2,73% dwutlenku tytanu oraz 2,75% tlenku siarki(VI)), stanowiące ponad 5% ogólnego składu, nie biorą czynnego udziału w procesie rafinacji badanych barwników.

Węgiel aktywny, alternatywnie wykorzystywany w oczyszczaniu produktów ropopochodnych, posłużył jako materiał porównawczy efektywności rafinacji między różnymi rodzajami sorbentów, gdyż jak wynika z doświadczeń przemysłowych, to węgiel daje najlepsze rezultaty podczas oczyszczania i bielenia parafiny, jednakże w procesie z wykorzystaniem zielonego barwnika nie otrzymano zadowalającego rezultatu, natomiast z wykorzystaniem czerwonego już przy drugim nawrocie otrzymano dobrej jakości produkt.

Ziemia Palmax w oczyszczaniu zielonego barwnika już przy drugim nawrocie pozwoliła uzyskać zadowalający efekt, niemal pozbawiając próbkę koloru, z kolei przy badaniu czerwonego barwnika przy pierwszej rafinacji już uzyskano bardzo dobry efekt, tym samym zyskując przewagę nad innymi rodzajami ziemi, oceniono ją zatem jako lidera tego badania.

Wszystkie ziemie w blisko 55% składają się z tlenku krzemu, co na pewno jest głównym czynnikiem nadającym im właściwości oczyszczania z barwników parafiny, natomiast ten związek występuje w bardzo przybliżonych proporcjach w każdej z ziemi, co pozwala wyciągnąć wniosek, że nie jest to główny związek determinujący jakość rafinacji. Jednakże ziemia, które dały oczekiwany rezultat, składają się w większej ilości z tlenku magnezu w przeciwieństwie do ziemi Galleon V2G, co prowadzi do konkluzji, że właśnie przewaga tego związku daje lepszy efekt podczas rafinacji. Kontynuując badanie nad różnicami w składach chemicznych, należy zwrócić uwagę na kolejne związki występujące w większym stężeniu w ziemi Palmax w porównaniu z innymi ziemiami i dające satysfakcjonujący rezultat. Są to tlenek żelaza(III) oraz tlenek wapnia, co najprawdopodobniej przekłada się na ostateczny efekt rafinacji. Pozostałe związki występują w proporcjach niedających jednoznacznych wyników w analizie.

Należy wspomnieć, że wszystkie ziemie, które analizowano w pracy, zostały chemicznie aktywowane przy użyciu różnych rodzajów związków chemicznych. Stanowią tajemnice zakładowe nieujawnione w badaniach otrzymanych przez przedsiębiorstwo, zatem jednoznaczne określenie optymalnych składów może nie być możliwe na tym stadium zaawansowania badań. Wpływ na efektywność procesu miał nie tylko skład chemiczny ziemi, ale też etap aktywacji, którego głównym zadaniem jest nadanie zwiększonej porowatości. Grubość zmieszania ziemi również wpływa na efektywność sorbentów w procesie rafinacji, gdyż zwiększa to powierzchnię adsorpcji.

13. ANALIZA WYNIKÓW BADANIA WPŁYWU WOSKU PALMOWEGO NA RAFINACJĘ

W przeprowadzonym badaniu wykorzystano jeden z najbardziej popularnych wypełniaczy parafiny – wosk palmowy. Barwą i właściwościami jest on zbliżony do surowca, który ma imitować, natomiast pogarsza charakterystyki palenia, twardości, a co najważniejsze – rafinacji. Celem tego badania było określenie, w jakim stopniu wosk palmowy utrudnia proces rafinacji. Zauważono, że przy stosowaniu mieszaniny 50% parafiny i 50% wosku palmowego ilość sorbentów pierwotnie wystarczająca do pełnego oczyszczenia parafiny, dała znikomy efekt w przypadku zielonego barwnika, a w przypadku czerwonego barwnika i użycia węgla aktywnego rezultat był umiarkowany.

Badania nad stosowaniem dopełniaczy w postaci wosku palmowego w procesie rafinacji wykazały, że tego rodzaju dodatki mogą wprowadzać pewne utrudnienia w procesie. Uzyskane wyniki wskazują, że obecność wosku palmowego może prowadzić do powstania nowych wiązań chemicznych w mieszaninie, które charakteryzują się specyficznymi właściwościami fizykochemicznymi. Te właściwości sprawiają, że usuwanie wosku palmowego w procesie rafinacji staje się bardziej skomplikowane i czasochłonne. Analizując te wyniki, można wnioskować, że konieczne jest dalsze badanie wpływu wosku palmowego i innych rodzajów dopełniaczy (takich jak woski sojowe czy tłuszcze zwierzęce) na proces rafinacji, aby zrozumieć dokładne mechanizmy, jakie zachodzą podczas tego procesu. Ponadto istnieje potrzeba rozwijania nowych strategii i technologii rafinacji, które mogą skutecznie radzić sobie z wyzwaniami związanymi z obecnością tego typu dopełniaczy.

Wyjątkowym rezultatem eksperymentu jest wynik analizy 4% Palmax i 2% węgla, jakie wykorzystano na podstawie danych literaturowych. Te dwie substancje, połączone w określonych proporcjach, wykazują wyraźny efekt synergii. Przykładem tej synergii jest badanie z użyciem zielonego barwnika: po zastosowaniu wyłącznie sorbentów nie przyniosło ono praktycznie żadnych rezultatów. Jednak w przypadku ich wspólnego użycia w sumarycznej gramaturze uzyskano śnieżnobiałą kompozycję parafinową z delikatną poświatą seledynu. Ten efekt ilustruje, że składniki te, oddzielnie nieskuteczne, w synergii tworzą nowe właściwości prowadzące do pożądanых rezultatów. W drugim badaniu nad barwnikiem czerwonym uzyskano podobny efekt, gdzie mieszanka sorbentów pozwoliła osiągnąć znacznie lepsze rezultaty niż ich rozdzielne zastosowanie. To zjawisko sugeruje istnienie niezwyklej synergii między tymi dwoma sorbentami. Analiza wskazuje na potrzebę dalszych badań nad mechanizmami oddziaływania pomiędzy poszczególnymi składnikami, aby lepiej zrozumieć procesy chemiczne, które prowadzą do synergicznego efektu.

14. PODSUMOWANIE

Eksperymenty odbywały się w warunkach laboratoryjnych pozwalających na badanie wielkich dawek sorbentów. Nie byłoby to możliwe poza laboratorium ze względu na wysokie koszty materiałów i robocizny. W przedsiębiorstwie stosuje się praktykę do trzech prób rafinacji. Większość kompozycji powinna się w tym czasie odbarwić, w przeciwnym razie rafinacja może się nie opłacić.

Przeanalizowano tylko dwa kolory, z których zielony barwnik okazał się trudniejszy do wybielenia niż czerwony, jednak w przemyśle stosuje się wiele różnych kolorów. Są też inne czynniki wpływające na utrudnienia podczas rafinacji parafin, np.: używanie różnych baz olejowych stanowiących podstawę barwników, inne metody aktywowania sorbentów, różny stopień zmielenia sorbentu, wszystkie te czynniki wpływają na efektywność procesu wybielenia.

Podziękowania

Publikacja powstała na podstawie referatu 64. Konferencji Barbórkowej, który zajął I miejsce w XVI sekcji. Serdeczne wyrazy wdzięczności kieruję w stronę pana dr. inż. Mariusza Niekurza, opiekuna Koła Naukowego „Menadżer Produkcji”. Dziękuję za pomoc przy pracy oraz wsparcie merytoryczne.

Chciałbym również podziękować zarządowi i pracownikom firmy Terra Trade sp. z o.o. za możliwość przeprowadzenia badań, udostępnienie dokumentów i informacji oraz wsparcie naukowe i technologiczne. Dziękuję za przekazaną wiedzę oraz profesjonalne podejście mentorskie do badań.

LITERATURA

- [1] Szymańska J.A., Frydrych B., *Parafina stała – dymy*, Podstawy i Metody Oceny Środowiska Pracy, nr 3(49), 2006, s. 133–143.
- [2] Donczoa B., Guttman A., *Biomedical analysis of formalin-fixed, paraffin embedded tissue samples: The Holy Grail for molecular diagnostics*, Journal of Pharmaceutical and Biomedical Analysis, vol. 155, 2018, s. 125–134, <https://doi.org/10.1016/j.jpba.2018.03.065>.
- [3] Pilat S., *Zarys technologii nafty*, Drukarnia i Litografia Piller – Neumann, Lwów 1939, reprint: Drukarnia Wydawnicza im. W.L. Anczyca, Kraków 2001.
- [4] Syrek H., *Parafiny i woski – tradycja badawcza, rozwój technologii i wdrożenia*. Nafta-Gaz, r. 65, nr 1, 2009, s. 50–57.
- [5] *Kirk-Othmer Encyclopedia of Chemical Technology*, Vol. 28, Wiley John and Sons, New York 2007.
- [6] Materiały pozyskane z laboratorium firmy „Terra Trade” sp. z o.o. [materiały niepublikowane].
- [7] Makles Z., Pośniak M., *Substancje emitowane z palących się świec*, Bezpieczeństwo Pracy: Nauka i Praktyka, nr 6, 2003, s. 28–31.
- [8] Gliński M., *Ograniczanie zapylenia na stanowiskach pracy*, Centralny Instytut Ochrony Pracy, Warszawa 1999.
- [9] Gliński M., *Ograniczenie emisji zanieczyszczeń w pomieszczeniach pracy. Przykłady obudów wentylacji miejscowej wywiewniczej*, Centralny Instytut Ochrony Pracy, Warszawa 2001.
- [10] Murat P., Ferret P.J., Coslédan S., Simon V., *Development of a HS-SPME-GC-MS method for the analysis of phthalates in glycerin and liquid paraffin: application to safety evaluation of cosmetic packagings*, Analytical and Bioanalytical Chemistry, nr 412, 2020, s. 5157–5168, <https://doi.org/10.1007/s00216-020-02519-6>.

- [11] Tobisz K., *Negatywny wpływ wybranych składników preparatów kosmetycznych na skórę a świadomość klientek gabinetów kosmetycznych*, Studenckie Zeszyty Naukowe. Kosmetologia, nr 1(1), 2016, s. 47–71.
- [12] Rotkiewicz D., Konopka I., Tanska M., *Barwniki karotenoidowe i chlorofilowe olejów roślinnych oraz ich funkcje*, Rośliny Oleiste – Oilseed Crops, t. 23, 2002, s. 561–579.
- [13] Antosz A., Ptak S., *Badania możliwości powtórnego wykorzystania surowców odpadowych powstających w trakcie produkcji świec*, Nafta-Gaz, r. 78, nr 10, 2022, s. 760–775, <https://doi.org/10.18668/NG.2022.10.07>.

Patrycja Wrona*, Aleksandra Brzóska*, Kacper Staszal*, Maciej Manecki**

GEOCHEMICZNĄ IMMOBILIZACJA PROMIENIOTWÓRCZEGO TORU: MINERALOGIA W SŁUŻBIE POLSKIEJ ATOMISTYKI

Jednym z najefektywniejszych sposobów immobilizacji pierwiastków szkodliwych jest ich wytrącanie w postaci faz krystalicznych. W projekcie badano możliwości i efektywności usuwania Th z roztworów wodnych przez strącanie w formie krystalicznych fosforanów ołowiu. Synteza apatytów ołowiowych polegała na wkraplaniu do roztworu Th o stężeniu ~400 mg/l w pH 3, 5 i 7 roztworów zawierających: Pb^{2+} , PO_4^{3-} i Cl^- (eksperyment A), Pb^{2+} i PO_4^{3-} (eksperyment B) oraz PO_4^{3-} (eksperyment C). Powstałe osady scharakteryzowano za pomocą XRD i SEM, a roztwory zawierające Th przed strącaniem i po strąceniu analizowano z użyciem ICP-OES. W eksperymencie A powstał piromorfit $\text{Pb}_5(\text{PO}_4)_3\text{Cl}$, w B w pH 3 ‘fosfoszultenit’ PbHPO_4 , a w pH 5 i 7 głównie hydroksylpiromorfit $\text{Pb}_5(\text{PO}_4)_3\text{OH}$. W wariancie C żadna faza nie powstała. W eksperymentach A i B krystalizacja obniżyła stężenie Th z 400 ppm do 0,05 ppm (efektywność 99,9%) dzięki substitucjom Th w fazach fosforanowych. Po raz pierwszy wykazano, że obecność Pb jest konieczna do usuwania Th z roztworu w formie fosforanów. Wyniki wskazują na perspektywy rozwoju skutecznych metod usuwania Th z zanieczyszczonych roztworów i odpadów promieniotwórczych.

GEOCHEMICAL IMMOBILIZATION OF RADIOACTIVE THORIUM: MINERALOGY IN SERVICE OF POLISH NUCLEAR POWER PROGRAM

One of the most effective methods to immobilize hazardous elements is their precipitation as crystalline phases. This study investigated the removal of thorium (Th) from aqueous solutions by precipitating as crystalline lead phosphates. The synthesis of lead apatites involved dropwise mixing of solutions containing: Pb^{2+} , PO_4^{3-} and Cl^- (experiment A), Pb^{2+} and PO_4^{3-} (experiment B) and PO_4^{3-} (experiment C), with Th solution (~400 mg/L) at pH 3, 5, and 7. The precipitates were characterized by XRD and SEM, while solutions with Th were analyzed before and after precipitation using ICP-OES. Experiment A produced pyromorphite $\text{Pb}_5(\text{PO}_4)_3\text{Cl}$, experiment B yielded ‘phosphoschultenite’ PbHPO_4 at pH 3 and primarily hydroxylpyromorphite $\text{Pb}_5(\text{PO}_4)_3\text{OH}$ at pH 5 and 7. In variant C, no phase formed. Crystallization in experiments A and B reduced Th concentration from 400 ppm to 0.05 ppm, achieving 99.9% efficiency due to Th substitutions in phosphate phases. This study demonstrated that Pb presence is essential for Th removal in phosphate form. The results indicate the prospects of effective Th removal from contaminated solutions and radioactive waste.

* AGH Akademia Górniczo-Hutnicza, Wydział Geologii, Geofizyki i Ochrony Środowiska, Studenckie Koło Naukowe Geologów.

** AGH Akademia Górniczo-Hutnicza, Wydział Geologii, Geofizyki i Ochrony Środowiska, Katedra Mineralogii, Petrografii i Geochemii.

1. WSTĘP

Wykorzystanie pierwiastków promieniotwórczych wiąże się z wieloma wyzwaniami technologicznymi. Zjawiska związane ze szkodliwym wpływem tych substancji na ludzki organizm oraz kwestie składowania odpadów promieniotwórczych stają się przedmiotem intensywnych badań i działań mających na celu minimalizację negatywnych skutków. Dlatego badania nad immobilizacją, sorpcją czy odzyskiwaniem pierwiastków radioaktywnych, w tym toru, są kluczowe nie tylko ze względu na ich znaczenie w przemyśle jądrowym, ale także w aspekcie ochrony zdrowia ludzi i dbałości o środowisko.

Tor wchodzi w skład szeregu promieniotwórczego uranowo-torowego, co sprawia, że zagrożenia z nim związane dotyczą przemysłu energetycznego oraz przechowywania odpadów radioaktywnych. Pierwiastek ten może pojawiać się w ściekach powstałych na skutek eksploatacji niektórych pokładów węgla kamiennego [1]. Może też być wykorzystywany, podobnie jak uran, jako paliwo w reaktorach jądrowych. Składowanie odpadów promieniotwórczych również stanowi olbrzymie wyzwanie logistyczne wymagające specjalnych zabezpieczeń. Zagrożenia środowiskowe związane z promieniotwórczym torem wynikają więc z jego potencjalnej mobilności, dlatego wciąż trwają intensywne badania nad opracowaniem metod immobilizacji tego pierwiastka.

Tor występuje w naturze głównie w formie czterowartościowego kationu Th^{4+} . Może tworzyć silne kompleksy metaloorganiczne (m.in. z cytrynianem i szczawianem). Ma także zdolność tworzenia kompleksów z jonami nieorganicznymi, takimi jak: Cl^- , NO_3^- , H_3PO_4 , OH^- , HPO_4^{2-} , H_2PO_4^- , SO_4^{2-} i F^- [2]. Wolne jony Th^{4+} dominują w pH poniżej 3, natomiast w wyższym wykazują tendencję do tworzenia związków z grupami hydroksylowymi (OH^-). Mobilność jonów toru zmniejsza się wraz ze wzrostem pH w zakresie od 2 do 8, a stosunkowo niskie koncentracje toru w naturalnych wodach są dowodem, że może on tworzyć związki słabo rozpuszczalne [2].

Adsorpcja jest najpopularniejszą metodą usuwania toru i innych aktywności ze środowiska wodnego głównie ze względu na niski koszt oczyszczania. Wykorzystywane są do tego przede wszystkim krzemionka i glinokrzemiany (zeolity), ale również tlenki metali, węgiel aktywny i różnego rodzaju nanorurki. Obecność jonów fosforanowych poprawia sorpcję i ekstrakcję Th(IV) [3], a strącanie toru z fosforanami wapnia zmniejsza jego rozpuszczalność w roztworach wodnych [4]. Istnieje również metoda wytrącania toru przy użyciu pirofosforanu sodu [5]. Odpady zawierające radioaktywne pierwiastki mogą być również zabezpieczane przez stapianie, ceramizację, spiekanie, prasowanie na gorąco i inne metody wysokotemperaturowe [6]. W przypadku składowisk odpadów radioaktywnych, aby ograniczyć przedostawanie się zanieczyszczeń do środowiska, stosuje się różnego rodzaju geomembrany, bariery geochemiczne i wypełniacze reaktywne, które mają zmniejszać potencjalną migrację zanieczyszczeń do wód podziemnych i gruntowych [7].

W odpowiedzi na te wyzwania w niniejszej pracy przedstawiono wyniki wstępnych eksperymentów strącania toru z roztworów wraz z fosforanami ołowiu. Metoda immobilizacji Pb przez indukowaną w środowisku precypitację piromorfitu $\text{Pb}_3(\text{PO}_4)_3\text{Cl}$ jest dobrze poznaną technologią neutralizacji skażeń Pb w glebach i środowiskach skażonych [8]. W swych założeniach metoda polega na wytrąceniu fazy krystalicznej o tak niskiej rozpuszczalności, że immobilizowany pierwiastek przestaje stanowić zagrożenie dla środowiska. Takie właściwości

ma piromorfit. Postawiono hipotezę, że strącanie piromorfitu w obecności jonów Th^{4+} spowoduje w ten sam sposób immobilizację tego radioaktywnego pierwiastka. Przedstawione wyniki eksperymentów są bardzo obiecujące. Rozwój tej nowatorskiej metody może przyczynić się do opracowania skutecznych rozwiązań problemu odpadów promieniotwórczych, a tym samym – do zrównoważonego i bezpiecznego wykorzystania energii pochodzącej z pierwiastków promieniotwórczych.

2. METODYKA

Przeprowadzono trzy serie eksperymentów: strącanie Th z fosforanami w obecności Pb i Cl (eksperyment A), strącanie Th z fosforanami w obecności Pb przy nieobecności Cl (eksperyment B) i strącanie Th z fosforanami przy nieobecności Pb i nieobecności Cl (eksperyment C). Każdy eksperyment powtórzono przy pH równym 3, 5 oraz 7. Stężenia i warunki eksperymentów zestawiono w tabeli 1. Eksperymenty przeprowadzono przy dostępie powietrza, w temperaturze 21°C i pod ciśnieniem atmosferycznym. Użyto wody redestylowanej oraz odczynników o czystości do analizy: $\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$, $\text{NaH}_2\text{PO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$, NaCl firmy Chempur oraz NaOH i HNO_3 produkcji kolejno firmy STANLAB i Chempur. Strącanie polegało na równomiernym i jednoczesnym wkraplaniu roztworu zawierającego Pb^{2+} oraz roztworu zawierającego aniony (PO_4^{3-} i Cl^-) do roztworu zawierającego tor. Synteza przeprowadzana była w nadmiarze ołowiu: stosunek molowy Pb do Th wynosił 20:1. Po zmieszaniu roztworów zawiesiny były pozostawione na 7 dni, a następnie osad został oddzielony od roztworu przez wirowanie, przepłukany kilkakrotnie i wysuszony na powietrzu. Skład pierwiastkowy roztworów oznaczono metodą ICP (Optima 7300 DV). Skład fazowy osadów zidentyfikowano metodą proszkowej dyfraktometrii rentgenowskiej (dyfraktometr Rigaku SmartLab, promieniowanie $\text{CuK}\alpha$, krok pomiarowy $0,05^{\circ} 2\theta$ w zakresie $2\text{--}75^{\circ} 2\theta$). Analizę morfologii kryształów i ich składu pierwiastkowego wykonano przy użyciu elektronowej mikroskopii skaningowej SEM/EDS w trybie elektronów wstecznie rozproszonych BSE i przy użyciu detektora dyspersji energii EDS (FEI QUANTA FEG 200). Próbkę w stanie powietrznosuchym przymocowaną do podstawy przewodzącą taśmą były analizowane w trybie niskiej próżni bez naparowania warstwą przewodzącą.

Tabela 1. Zestawienie warunków eksperymentalnych

Eksperyment	pH	Th [mg/dm^3]	PO_4 [mg/dm^3]	Pb [mg/dm^3]	Cl [mg/dm^3]
A	3	400	1000	3500	120
	5				
	7				
B	3	400	1000	3500	–
	5				
	7				
C	3	400	1000	–	–
	5				
	7				

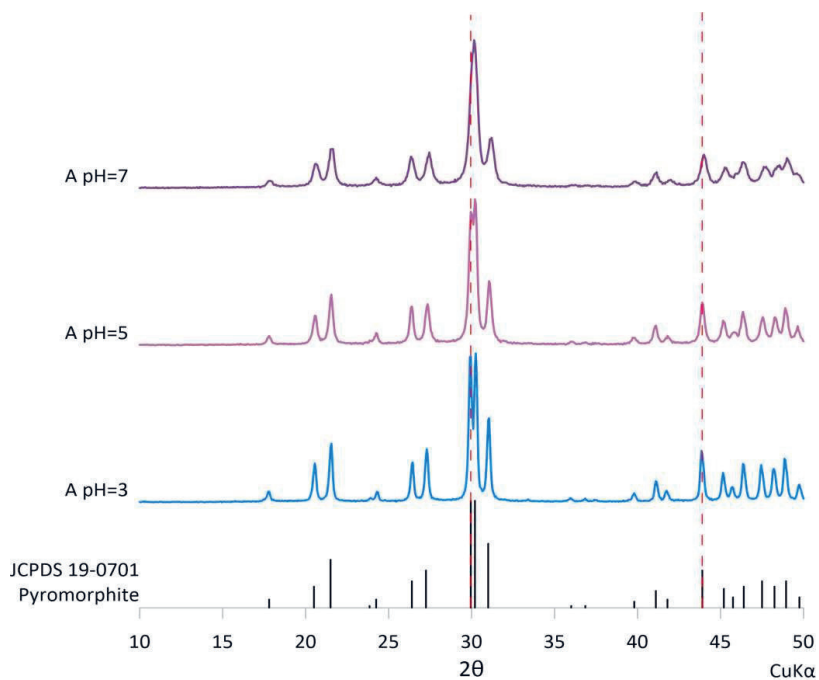
3. WYNIKI

Reakcja roztworów zawierających tor z roztworami fosforanowymi w obecności jonów Pb^{2+} doprowadziła do powstania osadów we wszystkich badanych odczynach pH, zarówno w eksperymentach A (w obecności jonów Cl^-), jak i w eksperymentach B (przy nieobecności jonów Cl^-). W eksperymencie C nie zaobserwowano powstawania żadnej fazy stałej. W wyniku wytrącenia osadów stężenie toru zostało obniżone z początkowego wynoszącego 400 mg/dm^3 do poziomu poniżej wykrywalności ICP-OES ($<0,05\text{ mg/dm}^3$) (tab. 2).

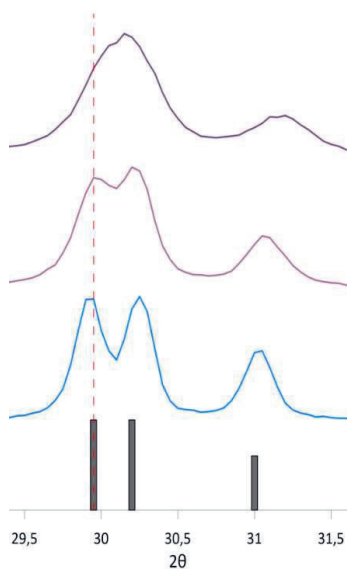
Tabela 2. Zmiana stężenia Th w roztworach wodnych

Eksperyment	pH	Początkowe stężenie Th [mg/dm ³]	Końcowe stężenie Th [mg/dm ³]	Efektywność usuwania Th [%]
A	3	400	<0,05	>99,9
	5	400	<0,05	>99,9
	7	400	<0,05	>99,9
B	3	400	<0,05	>99,9
	5	400	<0,05	>99,9
	7	400	<0,05	>99,9
C	3	400	400	0
	5	400	400	0
	7	400	400	0

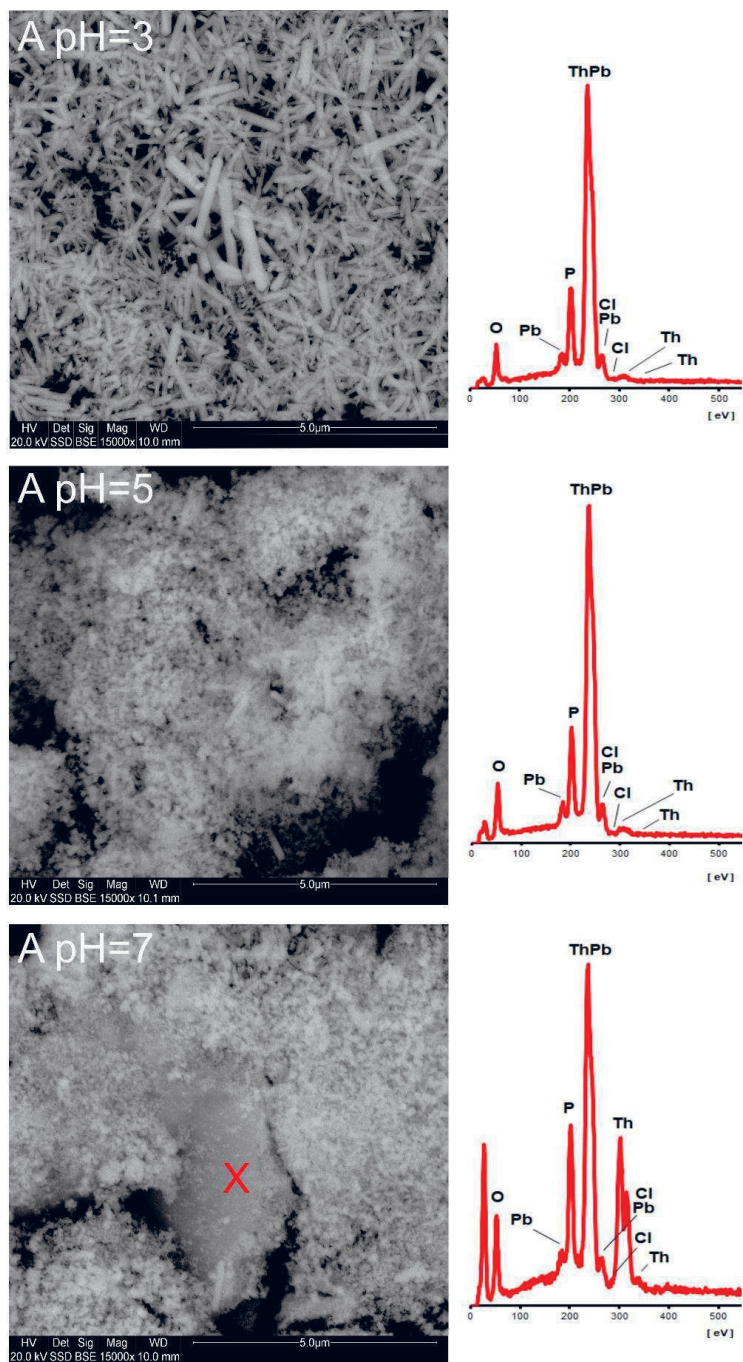
Strącanie toru fosforanami w obecności Pb i Cl (eksperyment A) we wszystkich badanych warunkach pH prowadzi do powstania krystalicznego piromorfitu $Pb_5(PO_4)_3Cl$ (rys. 1). Lekkie przesunięcie pozycji refleksów dyfrakcyjnych względem wzorca jest prawdopodobnie spowodowane częściowym podstawieniem Th za Pb w strukturze kryształów (rys. 2). Przesunięcia w kierunku wyższych kątów są zgodne ze zmniejszeniem rozmiarów sieci krystalicznej spowodowanym podstawieniem jonów o mniejszym promieniu jonowym: Th^{4+} o promieniu jonowym $0,094\text{ nm}$ za Pb^{2+} o promieniu jonowym $0,132\text{ nm}$. Mikrokryształy piromorfitu o rozmiarach do $2\text{ }\mu\text{m}$ mają charakterystyczny pokrój heksagonalnych słupków (rys. 3). Rozmiary krystalitów maleją ze wzrostem pH. Kryształom piromorfitu towarzyszą również bezkształtne agregaty zawierające Pb, P i Cl, ale o wyższej ilości Th. Na obecnym etapie badań trudno powiedzieć, czy jest to nanokrystaliczny piromorfit, czy też inna substancja.



Rys. 1. Dyfraktogramy rentgenowskie osadów powstałych w eksperymencie A w pH = 3, 5 i 7, zestawione z wzorcem PymJCPDS19-0701

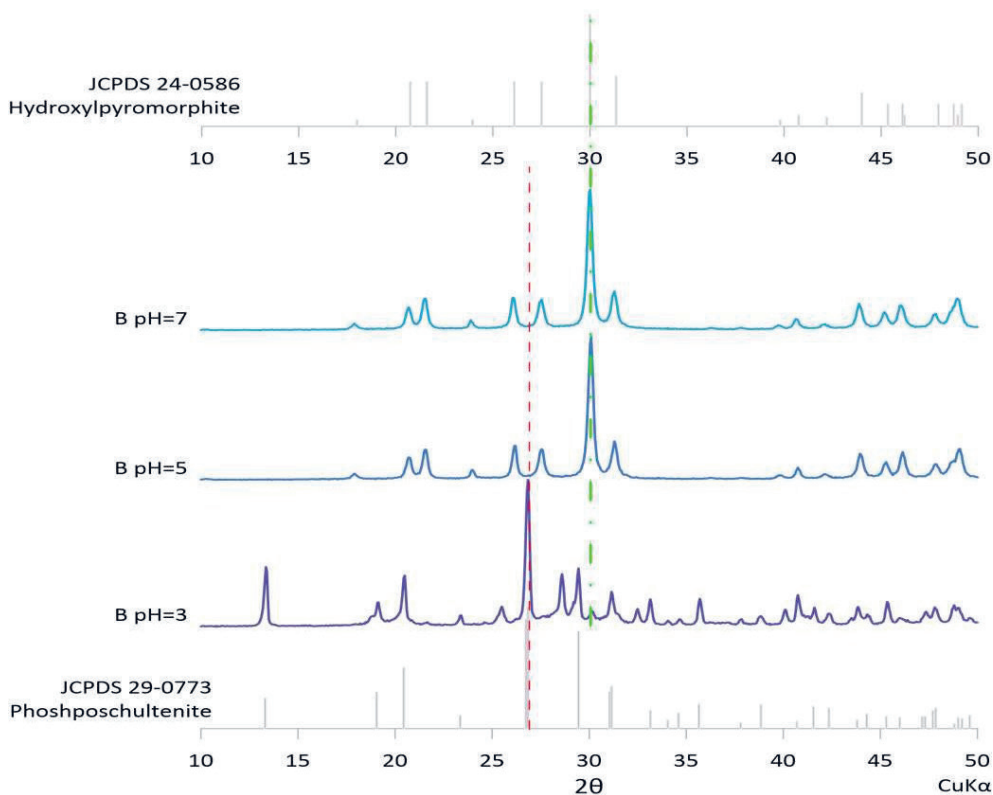


Rys. 2. Przesunięcie położenia pików dyfrakcyjnych osadu powstającego w eksperymencie A kolejno w pH = 3, 5 i 7 (przybliżony obraz w zakresie $29,5\text{--}31,5^\circ$ 2θ)



Rys. 3. Obrazy mikroskopowe SEM osadów uzyskanych w eksperymentach serii A oraz ich skład pierwiastkowy wskazujący na obecność Th (widma EDS)

Skład fazowy produktów eksperymentów serii B (przeprowadzonych przy nieobecności jonów Cl^-) zależy od pH. W kwaśnym roztworze o $\text{pH} = 3$ wykrystalizował głównie ‘fosfoszultenit’ PbHPO_4 w towarzystwie hydroksylpiromorfitu $\text{Pb}_5(\text{PO}_4)_3(\text{OH})$ (rys. 4).

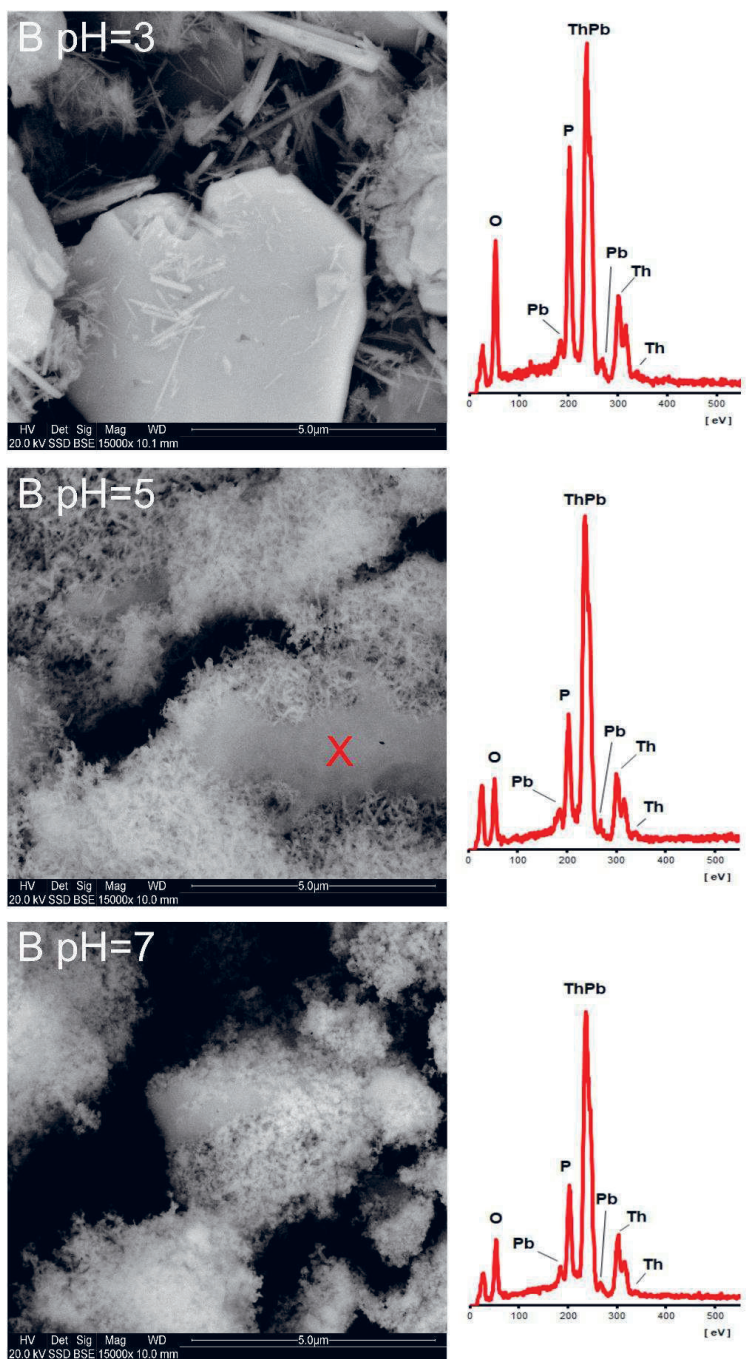


Rys. 4. Skład fazowy osadów powstałych w eksperymentach serii B (przy nieobecności jonów Cl^-)

Nazwa ‘phosphoschulterite’ została zaproponowana przez Młynarską ze współautorami [9] oraz Wudarską ze współautorami [10], ale nie jest jeszcze zaakceptowana przez IMA.

Na zdjęciach SEM ‘fosfoszultenit’ widoczny jest w postaci dużych kryształów o pokroju blaszkowym pokrytych słupkami hydroksylpiromorfitu. Przy wyższym pH powstał wyłącznie hydroksylpiromorfit.

Podobnie jak w eksperymentach serii A kryształom hydroksylpiromorfitu towarzyszyły bezkształtne agregaty bogate w tor (rys. 5).



Rys. 5. Obrazy mikroskopowe SEM osadów uzyskanych w eksperymentach serii B oraz ich skład pierwiastkowy wskazujący na obecność Th (widma EDS)

4. PODSUMOWANIE I WNIOSKI

Wyniki eksperymentów wskazują na to, że współstrącenie toru z fosforanami ołowiu jest niezwykle skuteczną metodą immobilizacji tego radioaktywnego pierwiastka. W wyniku reakcji stężenie toru spada do poziomu poniżej wykrywalności ICP, a produktem jest osad złożony z trudno rozpuszczalnych i trwałych faz. Reakcja nie zachodzi przy nieobecności Pb. Stwierdzono, że usunięty z roztworu tor został związany w strukturze krystalicznej piromorfitu, minerału o bardzo niskiej rozpuszczalności. Wytrącanie piromorfitu w skażonych środowiskach jest stosowane do immobilizacji ołowiu.

Przedstawione wyniki badań wskazują na to, że ta sama metoda może zostać skutecznie użyta również do immobilizacji toru. W przeciwieństwie do wielu innych sposobów usuwania toru z roztworów wodnych zaproponowana metoda nie wymaga podwyższonej temperatury. Obecnie prowadzone są badania ewentualnego wpływu podstawień toru na rozpuszczalność i inne właściwości termodynamiczne piromorfitu stanowiące o jego środowiskowej stabilności.

Zaproponowana nowa metoda może otworzyć możliwości rozwoju zarówno skutecznych technologii usuwania toru z zanieczyszczonych roztworów oraz odpadów zawierających promieniotwórcze pierwiastki, jak i rozwoju technologii barier geochemicznych oraz wypełniaczy pojemników stosowanych do przechowywania odpadów promieniotwórczych. Ze względu na swój innowacyjny potencjał zaprezentowana metoda immobilizacji toru może mieć znaczący wpływ na zwiększenie bezpieczeństwa rozwijającej się w Polsce energetyki jądowej.

LITERATURA

- [1] Olkusi T., Stala-Szlugaj K., *Występowanie pierwiastków promieniotwórczych w węglach kamiennych pochodzących z GZW, w skałach przywęglowych, w wodach kopalnianych oraz w odpadach*, Gospodarka Surowcami Mineralnymi, t. 25, z. 1, 2009, s. 5–17.
- [2] Langmuir D., Herman J.S., *The mobility of thorium in natural waters at low temperatures*, Geochimica et Cosmochimica Acta, vol. 44, iss. 11, 1980, s. 1753–1766, [https://doi.org/10.1016/0016-7037\(80\)90226-4](https://doi.org/10.1016/0016-7037(80)90226-4).
- [3] Gładysz-Płaska A., *Removal of uranium and thorium from aqueous solutions*, SOLARIS National Synchrotron Radiation Centre, https://synchrotron.uj.edu.pl/en_GB/aktualnosci/-/journal_content/56_INSTANCE_ZEhuXSihDJbq/1457771/155137887 [dostęp: 8.05.2024].
- [4] Ames L.L., Rai D., *Radionuclide Interactions with Soil and Rock Media. Volume 1: Processes Influencing Radionuclide Mobility and Retention: Element Chemistry and Geochemistry: Conclusions and Evaluation*, Final Report for Contract 68-03-2514, EPA-68-03-2514, U.S. Environmental Protection Agency, Las Vegas, Nevada 1978.
- [5] Borai E.H., Ahmed I.M., Shahr El-Din A.M., Abd El-Ghany M.S., *Development of selective separation method for thorium and rare earth elements from monazite liquor*, Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry, vol. 316, 2018, s. 443–450, <https://doi.org/10.1007/s10967-018-5814-4>.

- [6] Pilania R.K., Dube C.L., *Matrices for radioactive waste immobilization: A review*, *Frontiers in Materials*, Sec. Ceramics and Glass, vol. 10, 2023, 1236470, <https://doi.org/10.3389/fmats.2023.1236470>.
- [7] Stoch P., Stoch A., *Ceramizacja odpadów radioaktywnych*, *Materiały Ceramiczne*, r. 59, nr 3, 2007, s. 95–101, https://www.researchgate.net/profile/Pawel-Stoch/publication/279678577_Ceramizacja_odpadow_radioaktywnych/links/55e5f7d408aebdc0f58bab7c/Ceramizacja-odpadow-radioaktywnych.pdf [dostęp: 8.05.2024].
- [8] Manecki M., *Lead in water and soil: Speciation, toxicity, and treatment technologies*, [w:] Maurice P.A. (ed.), *Encyclopedia of Water: Science, Technology, and Society*, John Wiley & Sons, Hoboken 2019, s. 1713–1725, <https://doi.org/10.1002/9781119300762.wsts0230>.
- [9] Młynarska M., Manecki M., Bajda T., *Structural and Raman spectroscopy studies of schultenite – phosphoschultenite isomorphic series*, *Geology, Geophysics and Environment*, vol. 40, no. 1, 2014, s. 110–111.
- [10] Wudarska A., Sordyl J., Manecki M., Zawila A., Bajda T., *Vibrational spectroscopic study of synthetic analogs of schultenite $PbHAsO_4$ – “phosphoschultenite” $PbHPO_4$ solid solution series*, *Polyhedron*, vol. 211, 2022, 115534, <https://doi.org/10.1016/j.poly.2021.115534>.

Maksymilian Zarychta*, Rafał Czompelik**

ZASTOSOWANIE OGNIWA WODOROWEGO PEM JAKO MOBILNEJ JEDNOSTKI ZASILAJĄCEJ BOLID HYDRIVE 1

Referat dotyczy technologii ogniwa wodorowego typu PEM. W tekście omówiono podstawy teoretyczne, jego działanie oraz zastosowanie w bolidzie HYDRIVE 1. Ogniwo to przekształca wodór i tlen w energię elektryczną wykorzystywaną do zasilania układu elektrycznego, telemetrii i silnika. Przedstawiono specyfikację układu napędowego, uwzględniając jego efektywność i bezpieczeństwo. Przed podjęciem decyzji o zastosowaniu ogniwa wodorowego jako jednostki napędzającej bolid konieczne było zrozumienie jego działania od podstaw. W tym celu przeprowadzono na przestrzeni lat szereg badań, analizując wpływ czynników eksploatacyjnych oraz układu doprowadzenia wodoru na pracę ogniwa. Uzyskane wyniki porównano z danymi dostarczonymi przez producenta.

APPLICATION OF THE PEM HYDROGEN FUEL CELL AS A MOBILE POWER UNIT FOR THE HYDRIVE 1 VEHICLE

The scope of the paper covers the technology of the PEM hydrogen fuel cell, discussing the theoretical basis, its operation and application in the HYDRIVE 1 bolide. The cell converts hydrogen and oxygen into electricity used to power the electrical system, telemetry and engine. The specification of the drive system is presented, taking into account its efficiency and safety. When deciding to use a hydrogen cell as the propulsion unit of a car, an important fact is to understand its operation from the ground up. To this end, a several studies have been carried out over the years, analyzing the influence of operating factors and the hydrogen supply system on the operation of the cell. The results obtained were compared with the data provided by the manufacturer.

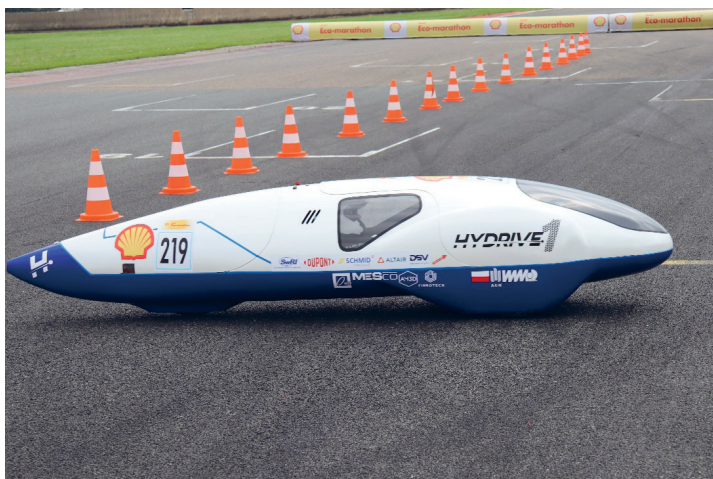
* AGH Akademia Górniczo-Hutnicza, Wydział Inżynierii Mechanicznej i Robotyki, Studenckie Koło Naukowe Konstruktorów MechatCAD.

** AGH Akademia Górniczo-Hutnicza, Wydział Energetyki i Paliw, Studenckie Koło Naukowe Konstruktorów MechatCAD.

1. WSTĘP

Intensywne badania nad wykorzystaniem wodoru jako alternatywnego źródła energii w transporcie rozpoczęto już w latach dziewięćdziesiątych ubiegłego wieku. Technologia wodorowych ogniw paliwowych jest obecnie jednym z najszybciej rozwijających się źródeł zasilania.

W odpowiedzi na rosnące zainteresowanie i postęp technologiczny w dziedzinie pojazdów napędzanych alternatywnymi źródłami energii członkowie Studenckiego Koła Naukowego Konstruktorów MechniCAD postawili sobie ambitny cel – skonstruowanie ekologicznego bolidu HYDRIVE 1 (rys. 1). Pojazd ten przeznaczony jest do udziału w międzynarodowych zawodach Shell Eco-marathon [1], których główną ideą jest promocja oraz rozwijanie ekologicznych źródeł energii.



Rys. 1. Bolid HYDRIVE 1 napędzany ogniwem wodorowym

Źródło: [2]

Działania koła naukowego propagują potrzebę zmiany sposobu myślenia o transporcie i alternatywnych źródłach energii. Shell Eco-marathon stanowi doskonałą okazję do wykazania się w tej dziedzinie i promowania zrównoważonej mobilności.

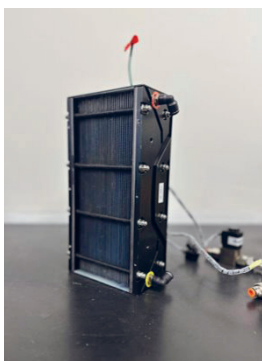
2. CEL PRACY

Celem niniejszej pracy było przeprowadzenie szczegółowych badań dotyczących sprawności ogniwa wodorowego, ocena jego efektywności oraz porównanie uzyskanych wyników z danymi dostarczonymi przez producenta. Badania obejmowały analizę parametrów technicznych, efektywności konwersji energii, stabilności pracy ogniwa oraz potencjalnego odchylenia od specyfikacji producenta. Przeprowadzenie eksperymentów praktycznych i precyzyjnych pomiarów miało na celu uzyskanie wiarygodnych danych umożliwiających rzetelne porównanie rzeczywistej wydajności ogniwa wodorowego z danymi dostarczonymi

przez producenta. Ostatecznym celem pracy była ocena rzeczywistej wartości technicznej i użytkowej analizowanego ogniwa wodorowego w kontekście parametrów deklarowanych przez producenta.

3. ANALIZA UKŁADU DOPROWADZENIA ENERGII W BOLIDZIE HYDRIVE 1

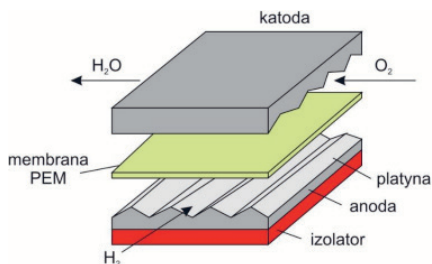
Podstawą analizy sprawności ogniwa wodorowego było dogłębne zrozumienie jego funkcjonowania. Ogniwo PEM (*Proton-Exchange Membrane*) zasilające bolid HYDRIVE 1 to produkt marki Horizon, model H-500 XP (rys. 2) [3]. Jest to 500-watowe, samonawilżające się ogniwo niskotemperaturowe, zasilane wodorem o czystości wynoszącej 99,99%.



Rys. 2. Ogniwo wodorowe Horizon H-500 XP z widocznymi membranami

Źródło: [2]

Ogniwa paliwowe typu PEMFC (*Proton-Exchange Membrane Fuel Cell*) składają się z: katody, anody i membrany polimerowej (schemat na rysunku 3). Protony powstałe w anodzie transportowane są przez membranę polimerową do katody, gdzie dochodzi do redukcji tlenu. Membrany często zbudowane są z materiałów takich jak nafion [4]. Ogniwo Horizon H-500 XP ma 30 warstw membran polimerowych [3].



Rys. 3. Schemat budowy ogniwa wodorowego PEM

Źródło: [4]

W ogniwie wodorowym typu PEM zachodzą wymienione niżej reakcje.

Utlenianie wodoru na anodzie:



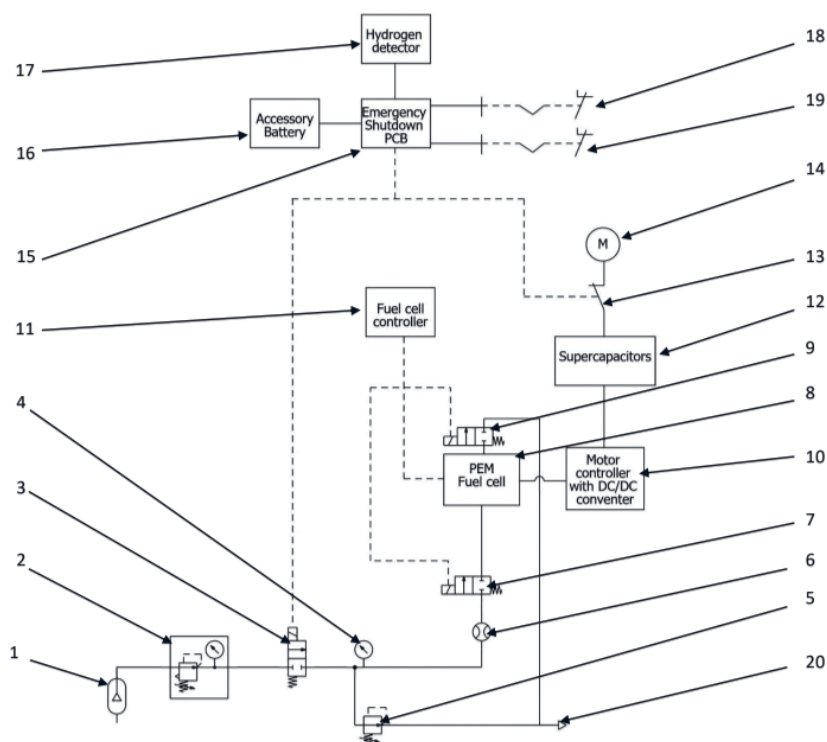
Redukcja tlenu na katodzie:



Redukcja sumaryczna:



Rysunek 4 przedstawia schemat doprowadzania energii w bolidzie HYDRIVE 1.



Rys. 4. Schemat doprowadzenia energii w bolidzie HYDRIVE 1. Objasnienia w tekście

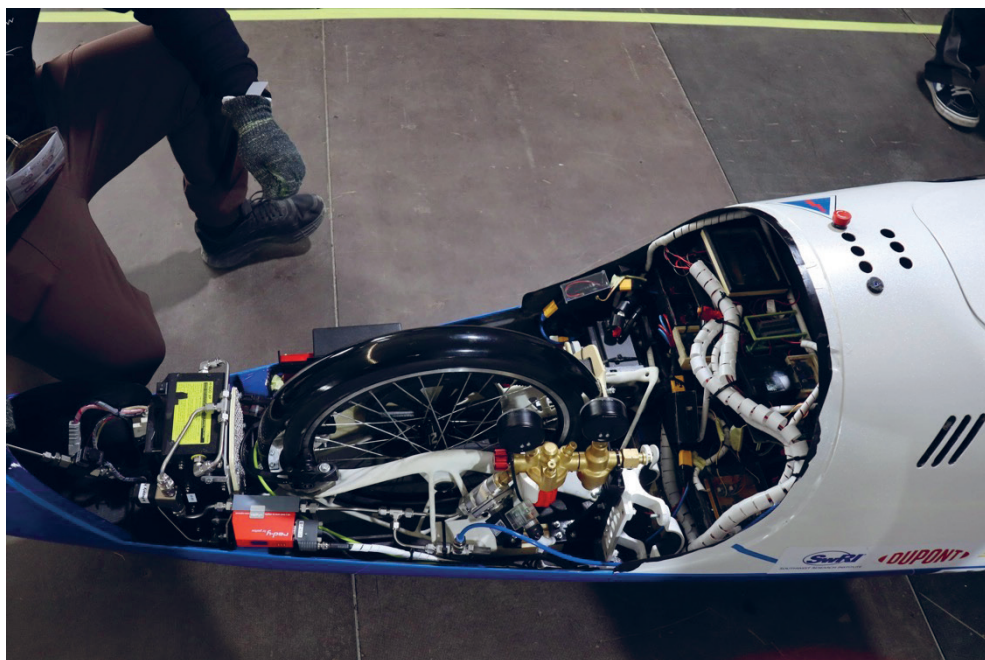
Źródło: [2]

Elementami przedstawionego na rysunku 4 systemu doprowadzania energii, decydującymi o jego sprawnym działaniu, są:

- 1) butla z wodorem,
- 2) regulator ciśnienia,
- 3) awaryjny zawór odcinający,
- 4) manometr,
- 5) elektrozawór,
- 6) przepływomierz,
- 7) zawór wlotowy ogniwa wodorowego,
- 8) HP X500 Fuel Cell,
- 9) zawór odpowietrzający ogniwo wodorowe,
- 10) sterownik silnika z przetwornicą DC/DC,
- 11) sterownik ogniwa,
- 12) stos superkondensatorów,
- 13) wyłącznik zasilania silnika,
- 14) silnik BLDC,
- 15) płytką PCB z wyłącznikiem awaryjnym,
- 16) bateria akcesoryjne,
- 17) czujnik wodoru,
- 18) przycisk awaryjny zewnętrzny,
- 19) przycisk awaryjny wewnętrzny,
- 20) wylot (purge).

Początkowym elementem układu doprowadzenia energii w bolidzie HYDRIVE 1 (rys. 4) jest butla z wodorem, która stanowi magazyn tego niezwykle efektywnego paliwa. Wodór przechowywany jest w butli pod wysokim ciśnieniem (200 barów), do której przymocowany jest dwustopniowy reduktor zapewniający ciśnienie względne w układzie równe 0,5 bara. Stalowe rurki skutecznie przesyłają wodór z butli do kolejnych komponentów układu. Elektrozawory, odgrywające kluczową rolę w tym systemie, sterują przepływem wodoru, umożliwiając precyzyjną kontrolę nad dostarczaniem paliwa do ogniwa. W przypadku gdy dojdzie do rozszczelnienia, wyłączają one dopływ wodoru w układzie. Purge (wylot) odpowiada za usuwanie wszelkich nieczystości i wilgoci z przesyłanego wodoru oraz ewentualnych wzrostów ciśnienia, co wpływa na efektywność i trwałość całego systemu. Przepływomierz monitoruje ilość przepływającego wodoru, umożliwiając precyzyjne dostosowanie ilości dostarczanego paliwa. Ogniwo wodorowe zamienia paliwo w prąd elektryczny, który jest następnie wykorzystywany do zasilania układu elektrycznego i silnika BLDC (*brushless direct-current motor*) w pojeździe. Ogniwo to jest umieszczone w miejscu zapewniającym optymalne warunki do jego funkcjonowania (rys. 5). Sterownik ogniwa odpowiada za koordynację pracy poszczególnych struktur. To on monitoruje parametry pracy ogniwa wodorowego i zapewnia optymalne warunki działania całego systemu.

Dzięki zintegrowanemu podejściu do układu doprowadzenia wodoru bolid HYDRIVE 1 osiąga wysoką efektywność i minimalizuje negatywny wpływ na środowisko, co czyni go innowacyjnym rozwiązaniem w dziedzinie mobilnych jednostek.



Rys. 5. Zdjęcie rzeczywistego układu doprowadzenia wodoru w bolidzie HYDRIVE 1

Źródło: [2]

4. METODYKA BADAŃ

Na przestrzeni lat możliwe było wykonanie kilku badań ogniwa. Podczas przeprowadzonych testów skoncentrowano się na analizie efektywności ogniwa wodorowego. W tym celu ogniwo zostało podłączone zarówno do obciążenia, które umożliwiało kontrolę natężenia i rejestrowanie generowanej mocy brutto P_{FC} , jak i do układu doprowadzenia wodoru. Podczas monitorowania dostarczanego wodoru korzystano z przepływomierza, który precyzyjnie odnotowywał wartość przepływu w litrach normalnych na minutę.

W trakcie eksperymentów, mających na celu uzyskanie kompleksowej oceny ogniwa, zwracano uwagę na zadane natężenie oraz wartość napięcia wytworzonego przez ogniwo pod wpływem różnych warunków obciążenia. Dodatkowo ze sterownika ogniwa odczytywano natężenie ogniwa wodorowego I_{FC} , czyli wartość generowanego natężenia pomniejszoną o natężenie zużywane na potrzeby własne ogniwa I_{PW} .

Różnorodne pomiary pozwoliły uzyskać pełny obraz pracy ogniwa wodorowego, jak i wykorzystanie dostarczanego mu wodoru. Wyniki pomiarów poddano analizie i wykorzystano do dalszych obliczeń rzeczywistej sprawności układu. W tabeli 1 przedstawiono dane z przykładowego badania.

Tabela 1. Badanie z dnia 10.06.2023 roku

I _{ST} [A]	U _{FC} [V]	P _{FC} [W]	I _{FC} [A]	I _{PW} [A]	P _{PW} [W]	P _{NET} [W]	EFF [%]	Przepływ [ln/min]
1	22,3	22,3	2,1	1,1	13,2	9,1	6,38	0,8
1,5	21,8	32,7	2,3	0,8	9,6	23,1	14,39	0,9
2	21,4	42,8	3,1	1,1	13,2	29,6	16,59	1,0
2,5	21,2	53	3,3	0,8	9,6	43,4	22,12	1,1
3	20,9	62,7	4,1	1,1	13,2	49,5	23,12	1,2
3,5	20,7	72,45	4,3	0,8	9,6	62,85	27,10	1,3
4	20,5	82,0	5,1	1,1	13,2	68,8	27,55	1,4
4,5	20,3	91,35	5,3	0,8	9,6	81,75	30,55	1,5
5	21,0	105,0	6,1	1,1	13,2	91,8	32,16	1,6
5,5	20,0	110,0	6,3	0,8	9,6	100,4	33,11	1,7
6	19,8	118,8	7,1	1,1	13,2	105,6	32,89	1,8
6,5	19,7	128,05	7,3	0,8	9,6	118,45	34,95	1,9
7	19,5	136,5	8,1	1,1	13,2	123,3	34,56	2,0
7,5	19,4	145,5	8,4	0,9	10,8	134,7	35,96	2,1
8	19,3	154,4	9,1	1,1	13,2	141,2	35,98	2,2
8,5	19,2	163,2	9,4	0,9	10,8	152,4	37,14	2,3
9	19,0	171,0	10,1	1,1	13,2	157,8	36,86	2,4
9,5	18,9	179,55	10,4	0,9	10,8	168,75	37,84	2,5
10	18,8	188	11,1	1,1	13,2	174,8	37,69	2,6
11	18,5	203,5	12,1	1,1	13,2	190,3	39,51	2,7
12	18,3	219,6	13,1	1,1	13,2	206,4	38,57	3,0
13	18,1	235,3	14,1	1,1	13,2	222,1	40,16	3,1
14	17,8	249,2	15,1	1,1	13,2	236	40,09	3,3
15	17,6	264,0	16,2	1,2	14,4	249,6	39,98	3,5
16	17,4	278,4	17,2	1,2	14,4	264	40,00	3,7
17	17,1	290,7	18,2	1,2	14,4	276,3	39,71	3,9

Źródło: [2]

W tabeli 1 podano następujące oznaczenia:

I_{ST} – natężenie zadawane na obciążeniu, sterujące pracą ogniwa [A],

U_{FC} – mierzone napięcie ogniwa wodorowego [V],

P_{FC} – moc brutto wytwarzana przez ogniwo wodorowe [W],

I_{FC} – mierzone natężenie ogniwa wodorowego [A],

I_{PW} – mierzone natężenie potrzeb własnych na podtrzymanie funkcjonowania ogniwa [A],

P_{PW} – moc potrzeb własnych na podtrzymanie funkcjonowania ogniwa [W],

P_{NET} – moc netto wytwarzana przez ogniwo wodorowe [W],

EFF – wyliczona rzeczywista sprawność ogniwa [%],

Przepływ – mierzony przepływ wodoru w układzie przez przepływomierz [l/min].

5. ANALIZA WYDAJNOŚCI OGNIWA WODOROWEGO

Na pierwszym etapie analizy wykorzystywane są dane producenta dotyczące zawartości energii elektrycznej w jednym kilogramie wodoru. Na tej podstawie przeliczana jest jej ilość na kilowatogodziny (kWh), co umożliwia lepsze zrozumienie potencjału energetycznego dostarczanego paliwa.

Zawartość energii w jednym kilogramie wodoru wynosi 120,1 MJ (LHV) $\approx$ 33,3 kWh [5]. Zastosowanie wzoru na objętość molową wodoru pozwala zidentyfikować korelację między potencjałem paliwa a ilością wytworzonej energii:

$$V = n \cdot \Phi \quad (4)$$

$$\left(\frac{1000 \text{ g}}{2 \frac{\text{g}}{\text{mol}}} \right) \cdot 22,4 \frac{\text{l}}{\text{mol}} = 11\,200 \text{ l}$$

Zatem 11 200 l pozwala uzyskać 33,3 kWh energii elektrycznej. Pod koniec pierwszego etapu, na podstawie proporcji, obliczana jest ilość wytworzonej mocy elektrycznej dla określonej ilości dostarczanego wodoru, wyrażonej jako przepływ 1 l/min. Ten krok pozwala zorientować się, ile energii elektrycznej można oczekiwać w zależności od przepływu dostarczanego paliwa.

$$11\,200 \text{ l} \rightarrow 33\,300 \text{ Wh}$$

$$1 \text{ l/min} \rightarrow x \text{ W}$$

$$x = \frac{1 \frac{\text{l}}{\text{min}} \cdot 33\,300 \text{ W} \cdot 60 \text{ min}}{11\,200 \text{ l}} = 178,393 \text{ W}$$

Przepływ jednego litra wodoru umożliwia uzyskanie 178,393 W mocy elektrycznej [3].

Na kolejnym etapie analizy skoncentrowano się na obliczeniach sprawności ogniwa w wybranym punkcie pracy, co skutkowało uzyskaniem istotnych danych, które stanowiły podstawę do opracowania modelu sprawności ogniwa wodorowego. Po obliczeniu reszty wartości umożliwiło to oszacowanie efektywności ogniwa w szerokim zakresie warunków operacyjnych. Ten krok pozwala na bardziej kompleksową ocenę i zrozumienie wydajności ogniwa w różnych scenariuszach.

Biorąc pod uwagę punkt $P_{NET} = 174,8$ W (natężenie zadawane na obciążeniu I_{ST}) z tabeli 1, w którym przepływomierz wskazał dla tej mocy pobór 2,6 l/min, policzono, że taka ilość wodoru jest w stanie wygenerować:

$$P_c = 2,6 \cdot 178,393 = 463,82 \text{ W}$$

Obliczenie sprawności:

$$\eta = \frac{P_{net}}{P_c} \cdot 100\% \quad (5)$$

$$\eta = \frac{174,8}{463,82} \cdot 100\%$$

$$\eta = 37,69\%$$

Sprawność ogniwa w wybranym punkcie wyniosła $\eta = 37,69\%$.

6. ZASTOSOWANIE APROKSYMACJI KWADRATOWEJ

W celu porównania obliczonych sprawności badanego ogniwa z wartościami podanymi przez producenta potrzebnych jest więcej danych. Na podstawie pomiarów producenta z przepływomierza udostępniono dziesięć punktów pracy (tab. 2). Przepływomierz, który znajduje się w bolidzie, dokonuje pomiaru z dokładnością do dziesiętnych części, natomiast firma Horizon zastosowała inny przyrząd, z dokładnością do części setnych.

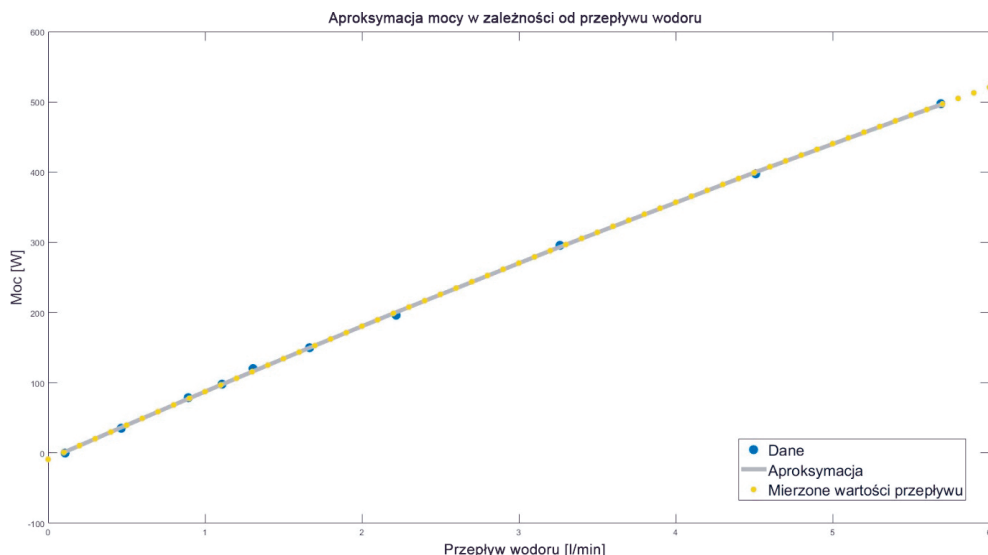
Tabela 2. Wartości wygenerowanych mocy w zależności od przepływu

Wygenerowana moc [W]	0	35,34	78,79	98,03	120,2	149,94	196,27	295,72	397,56	497,41
Przepływ [ln/min]	0,108	0,466	0,893	1,108	1,306	1,666	2,218	3,262	4,51	5,69

Źródło: [3]

Zastosowanie aproksymacji funkcją kwadratową miało na celu nałożenie dwudziestu sześciu punktów pomiarowych z naszych badań na funkcję aproksymacyjną opartą na dziesięciu punktach podanych przez producenta. Taka procedura umożliwiła efektywne przewidywanie wartości dla punktów pomiarowych nieopisanych przez firmę Horizon.

Wykorzystanie aproksymacji kwadratowej pozwoliło na otrzymanie gładkiej krzywej, która odzwierciedlała ogólny trend i charakterystykę pracy ogniwa wodorowego (rys. 6). Dzięki temu możliwe było uzyskanie estymacji wyników dla brakujących punktów, co ułatwiło zrozumienie, jak nasze pomiary korelują z danymi producenta. To podejście pozwoliło na porównanie prognozowanych wartości z rzeczywistymi wynikami pomiarów, co było istotne dla dokładnej oceny i porównania sprawności ogniwa w różnych warunkach pracy.



Rys. 6. Funkcja aproksymowanych danych

Wzór ogólny aproksymacji wielomianem drugiego stopnia przyjmuje postać:

$$f(x) = ax^2 + bx + c \quad (6)$$

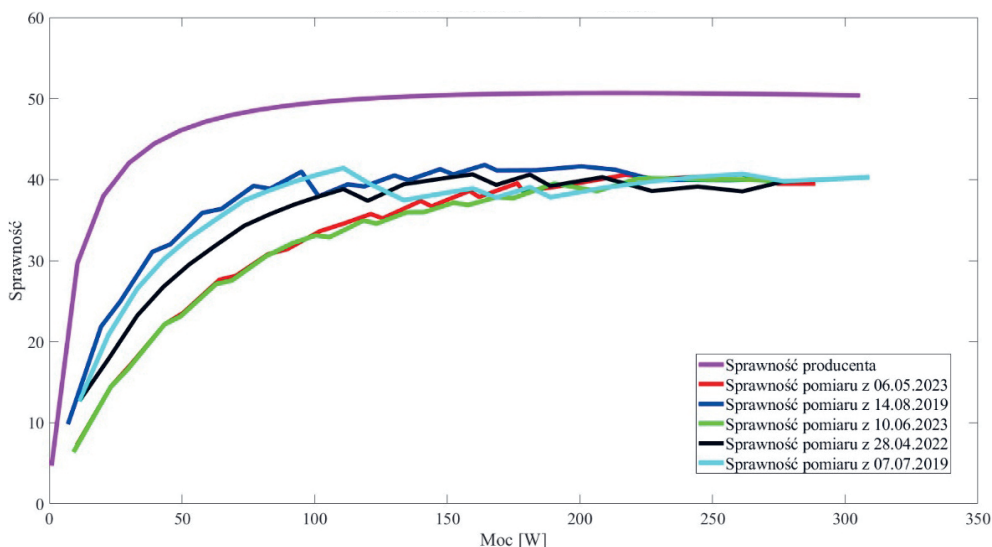
gdzie wartości a , b i c to współczynniki kwadratowego wielomianu.

Korzystając z programu MATLAB, wykonano aproksymację funkcją polyfit() z uwzględnieniem danych dostarczonych przez producenta wymienionych w tabeli 2. Funkcję polyval() użyto do obliczania wartości wielomianu dla zestawu punktów. Stosując aproksymację, policzono współczynnik determinacji o wartości $R^2 \in [0; 1] = 0,9998$.

7. ANALIZA WYNIKÓW

Wyniki analizy efektywności ogniwa wodorowego zostały zilustrowane na rysunku 7, na którym porównano krzywe sprawności badanego ogniwa uzyskane w trakcie badań na przestrzeni lat z krzywą sprawności podaną przez producenta.

Na wykresie na rysunku 7 widoczna jest zmiana sprawności ogniwa w odniesieniu do wygenerowanej mocy. Zauważalna jest istotna różnica pomiędzy wynikami z badań Koła Naukowego MechaNICAD a danymi producenta.



Rys. 7. Zestawienie obliczonych sprawności ogniwa wodorowego

Zaobserwowano wyraźne różnice w sprawności w przedziale od 0 W do 200 W. Wskazują one na zmiany sprawności na przestrzeni lat. W przedziale od 100 W do 250 W dochodzi do wahań obliczonych danych, a następnie stabilizacji w nominalnym punkcie pracy 300 W. Obserwuje się wzrost sprawności wraz ze wzrostem mocy, osiągający szczytowy poziom w zakresie 38–41%. W nominalnym punkcie pracy różnice w sprawności są minimalne.

Podziękowania

Pragniemy serdecznie podziękować całemu zespołowi Project HYDRIVE, zarówno obecnym członkom, jak i poprzednikom, którzy w projekt włożyli swoje serca i zaszczytli w nas zamiłowanie do pracy w kole naukowym. Nieocenione wsparcie okazał nam opiekun koła – Pan dr hab. inż. Wojciech Horak, prof. AGH, któremu serdecznie dziękujemy za sprawowanie pieczy nad działalnością SKNK MechaNICAD. Chcielibyśmy podziękować naszym rodzinom za wsparcie w trudnych momentach, za wiarę w nas i zrozumienie, gdy musieliśmy poświęcać czas na badania.

LITERATURA

- [1] Shell, *About Shell Eco-marathon*, <https://www.shellecomarathon.com/about.html> [dostęp: 21.02.2024].
- [2] Opracowanie własne, *SKNK MechaniCAD*.
- [3] Horizon, *H-500 XP Fuel Cell Stack*, <https://www.horizoneducational.com/h-500-xp-fuel-cell-stack/p1405> [dostęp: 23.02.2024].
- [4] Banaś-Gac J., *Laboratorium z elektrochemii ciała stałego. Ćwiczenie nr 2: Ogniwa paliwowe*, <https://home.agh.edu.pl/~jbanas/2.pdf> [dostęp: 12.02.2024].
- [5] Ludwig-Bölkow-Systemtechnik, *Wasserstoff Daten*, <http://www.h2data.de/> [dostęp: 4.12.2023].

Szymon Ziaja*

WPŁYW CYFRYZACJI NA NAJWAŻNIEJSZE WSKAŹNIKI EFEKTYWNOŚCI PROCESU PRODUKCYJNEGO NA PRZYKŁADZIE PROJEKTU AGH LEANLINE

Cyfryzacja i koncepcje Przemysłu 4.0 niewątpliwie przyczyniają się do zdobywania przez przedsiębiorstwa przewagi konkurencyjnej. Jest ona osiągana przez zwiększenie wydajności i stabilności procesu produkcyjnego m.in. dzięki wdrożeniu cyfryzacji. Głównym celem artykułu jest wykazanie jej wpływu na najważniejsze wskaźniki efektywności produkcji na przykładzie studenckiego projektu AGH LeanLine, realizowanego przez Studenckie Koło Naukowe Zarządzanie. Projekt AGH LeanLine dotyczy budowy kompleksowego systemu do nauczania metod i narzędzi *lean manufacturing*. Opisano plany dotyczące digitalizacji i autonomizacji tego projektu, w tym wdrożenie do symulacji procesu produkcji technologii realizujących koncepcję Przemysłu 4.0. Uzasadnienie konieczności i celowości wprowadzanych zmian przedstawiono w odniesieniu do praktycznych wskaźników służących do monitorowania efektywności procesu produkcyjnego.

IMPACT OF DIGITIZATION ON KEY PERFORMANCE INDICATORS OF THE PRODUCTION PROCESS ON THE EXAMPLE OF THE AGH LEANLINE PROJECT

Digitization and the concepts of Industry 4.0 undoubtedly contribute to companies' competitive advantage, which can be achieved, among other things, by improving the efficiency and stability of the production process through their implementation. The main purpose of the article is to demonstrate the impact of digitization on the most important indicators of production efficiency using the example of the student project AGH LeanLine, implemented by the Student Research Group "Management". The AGH LeanLine project concerns the construction of a comprehensive system for teaching Lean Manufacturing methods and tools. The article presents plans for the digitalization and autonomization of this project, including the implementation of technologies realizing the concept of Industry 4.0 in the simulation of the production process. The rationale for the necessity and advisability of the changes introduced is presented with reference to practical indicators for monitoring the efficiency of the production process.

* AGH Akademia Górniczo-Hutnicza, Wydział Inżynierii Lądowej i Gospodarki Zasobami, Studenckie Koło Naukowe „Zarządzanie”.

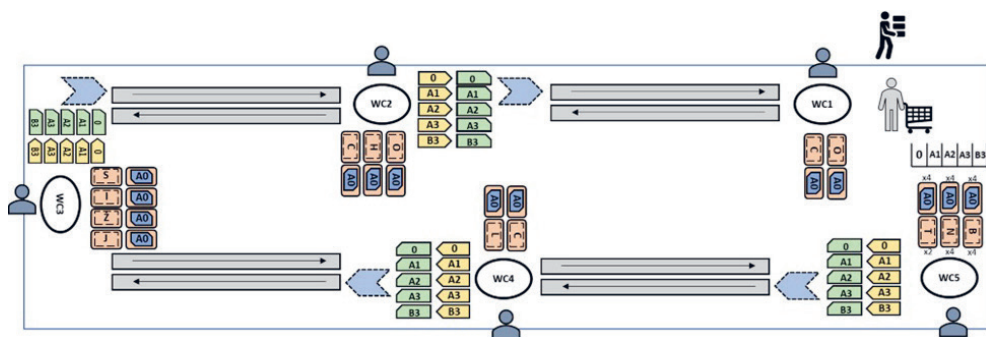
1. WPROWADZENIE, CZYLI KILKA SŁÓW O PROJEKCIE AGH LEANLINE 4.0

Projekt AGH LeanLine 4.0 stanowi kontynuację rozbudowy o nowe rozwiązania organizacyjne i technologie nowatorskiego systemu symulacyjnej linii produkcyjnej, zaprojektowanego i stworzonego przez dr. hab. inż. Pawła Bogacza, prof. AGH, wraz ze Studenckim Kołem Naukowym Zarządzanie AGH w Laboratorium Inżynierii Produkcji i Jakości AGH, zwanym LeanLab, które przedstawiono na rysunku 1.



Rys. 1. Spotkanie grupy projektowej AGH LeanLine z dr. hab. inż. Pawłem Bogaczem, prof. AGH, w Laboratorium Inżynierii Produkcji i Jakości AGH

AGH LeanLine jest kompleksowym środowiskiem do nauczania metod i narzędzi *lean manufacturing*. Umożliwia ono przeprowadzanie zaawansowanych symulacji procesu produkcyjnego, na których podstawie możliwe jest zdobywanie praktycznej wiedzy m.in. w dziedzinach zarządzania procesowego i szczupłego zarządzania. Nadrzędnym celem projektu jest zatem przede wszystkim umożliwienie praktycznej prezentacji i propagacji wiedzy na temat *lean manufacturing*, a także wspierających ją nowych technologii cyfrowych z zakresu automatyzacji i autonomizacji. Symulacje procesu produkcyjnego prowadzi się z wykorzystaniem krzeselka z klocków lego. Wraz z każdą rundą symulacyjną przeprowadza się kolejne próby usprawniania procesu produkcyjnego. Na rysunku 2 przedstawiono schemat budowy oraz przepływu produktu w procesie produkcji podczas symulacji na poziomie 4 i 5, po wykonaniu we wcześniejszych symulacjach (0–3) usprawnień organizacyjnych i procesowych opartych na metodyce *lean manufacturing*.



Rys. 2. Przepływ produktu oparty na systemie *kanban* w AGH LeanLine

Wymienione powyżej zakładane i realizowane plany projektowe dotyczą trzech głównych, komplementarnych i dopełniających się w swoim zakresie obszarów:

- automatyzacji, robotyzacji i autonomizacji,
- optymalizacji organizacyjnej na stanowiskach pracy,
- szkoleń i edukacji z wykorzystaniem stworzonego projektu linii.

W niniejszym artykule autor skupił się na pierwszym z przytoczonych obszarów z zamiarem wykazania wpływu cyfryzacji na najważniejsze wskaźniki efektywności procesu produkcyjnego przy wykorzystaniu systemu AGH LeanLine. Postanowiono odnieść wpływ cyfryzacji do rzeczywistych, przyszłych zalet wdrożenia nowych technologii do metodyki projektu zarówno w ujęciu liczbowym, jak i opisowym. Większość sformułowanych wniosków odniesiono do kontekstu praktycznego, dlatego autor przytoczył zestawienia wybranych wyników badań na temat aktualnych tendencji podejścia przedsiębiorstw produkcyjnych do wdrażania narzędzi realizujących koncepcję Przemysłu 4.0.

2. WSKAŹNIKI EFEKTYWNOŚCI PROCESU PRODUKCYJNEGO

Ciągła kontrola i ocena osiąganych wyników powinna być realizowana w różnych obszarach przedsiębiorstwa produkcyjnego, które jest nastawione na zarządzanie procesowe. Umożliwiają to m.in. kluczowe wskaźniki efektywności, czyli tzw. KPI (*key performance indicators*). Mierniki te dzielą się na dwie główne grupy: wskaźniki rezultatu oraz wskaźniki efektywności mające najczęściej charakter niefinansowy [1]. Wspólnymi cechami tych wskaźników są: aktualność, możliwość nadzorowania, prostota, znaczący wpływ na osiągnięcie sukcesu przez organizację [1, 2]. Metody i narzędzia pozwalające na ocenę efektywności procesu produkcyjnego powinny być nastawione przede wszystkim na realizację założonych celów. Do najważniejszych celów wpływających na poprawę efektywności produkcji można zaliczyć [3]:

- wzrost wydajności,
- podniesienie jakości wytwarzanych wyrobów,
- zredukowanie ilości produkcji w toku,
- skrócenie czasów cykli produkcyjnych,
- skrócenie czasu lub ilości przebrojeń.

Najważniejszym i najczęściej stosowanym wskaźnikiem w aspekcie monitorowania efektywności produkcji jest wskaźnik OEE (*overall equipment effectiveness*) [4]. Jest on miarą całkowitej efektywności stanowiska pracy w ujęciu operacyjnym. Wskaźnik ten może określać procent możliwej do uzyskania efektywności w przypadku maszyny, zespołu maszyn, ale także stanowiska pracy czy też dla całej linii produkcyjnej. Jest podstawą do podejmowania działań służących optymalizacji wykorzystania mocy produkcyjnej. Elastyczność, standaryzacja procesów oraz właściwa interpretacja wskaźnika efektywności są zasadniczymi czynnikami niezbędnymi do eliminacji marnotrawstw oraz ciągłego doskonalenia organizacji [5].

W tabeli 1 przedstawiono trzy elementy składowe OEE: dostępność, wydajność oraz jakość. Z matematycznego punktu widzenia wskaźnik OEE jest bowiem iloczynem tych trzech składowych. Światowy poziom tego wskaźnika według międzynarodowego standardu oscyluje w granicach 85% i osiągany jest przez czołowe przedsiębiorstwa produkcyjne. Za przeciętny wynik miary OEE uznawany jest poziom około 60%, natomiast przedsiębiorstwa rozpoczynające monitorowanie efektywności produkcji często raportują początkową wartość wskaźnika na poziomie nieprzekraczającym 40% [5, 6].

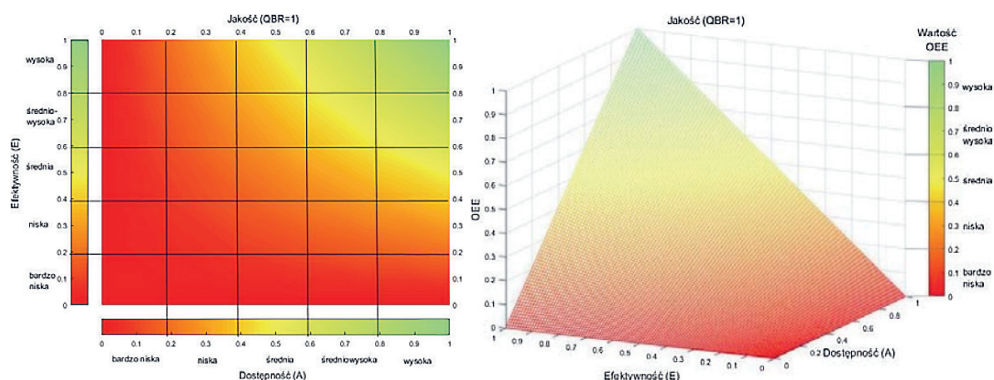
Tabela 1. Zestawienie składowych wskaźnika OEE

Wskaźnik podstawowy	dostępność	wydajność	jakość
Wzór matematyczny	$A = \frac{t_r}{t_t}$	$P = \frac{p \cdot t_c}{t_r}$	$Q = \frac{p_a}{p}$
Objaśnienia	t_r – czas dostępny t_t – czas całkowity	p – liczba sztuk wyprodukowanych sztuk wyrobu t_c – planowany czas cyklu produkcyjnego t_r – czas rzeczywisty	p_a – liczba sztuk wyrobu spełniających wymagania jakościowe

Źródło: opracowanie własne na podstawie [5]

Na rysunku 3 przedstawiono wykresy zależności wskaźnika OEE od składowych dostępności oraz wydajności przy założeniu stałej wielkości wskaźnika jakości na poziomie 100%. Na podstawie tych wykresów można sformułować kilka ważnych wniosków, potwierdzających charakterystykę współczynnika OEE i jego składowych [7]:

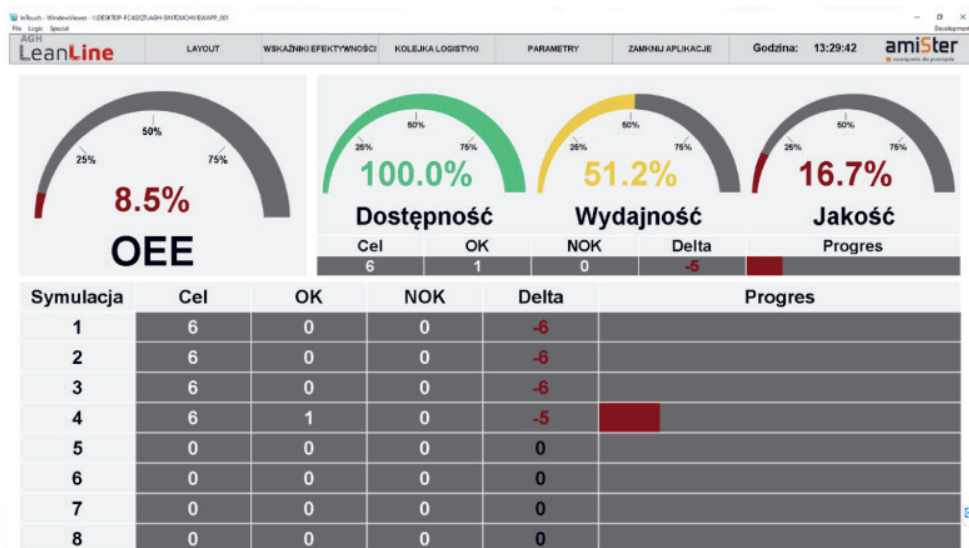
- przy względnie wysokiej dostępności stanowiska roboczego oraz wysokiej jakości produkowanych wyrobów niski poziom miary efektywności powoduje, że wartość OEE będzie przyjmowała stosunkowo niski poziom pomimo wysokich wartości dwóch pierwszych wskaźników prostych (A i Q);
- wskutek wysokiej jakości, średniej efektywności i dostępności wskaźnik OEE przyjmuje wartość niską;
- wysoka wartość wskaźnika OEE jest możliwa do osiągnięcia tylko przy założeniu jednoczesnego zapewnienia wysokich wartości wszystkich składowych: dostępności, wydajności i jakości.



Rys. 3. Wykres poziomicowy i przestrzenny zależności wskaźnika OEE od wskaźników podstawowych A oraz E dla $Q = 1$

Źródło: [7]

Na podstawie powyższych wskazań w każdej z przeprowadzanych symulacji procesu produkcyjnego w środowisku AGH LeanLine odbywa się obliczanie poziomu wskaźnika OEE. Przykładowy arkusz z wyliczonym wskaźnikiem efektywności dla jednej z przeprowadzonych symulacji przedstawiono na rysunku 4.

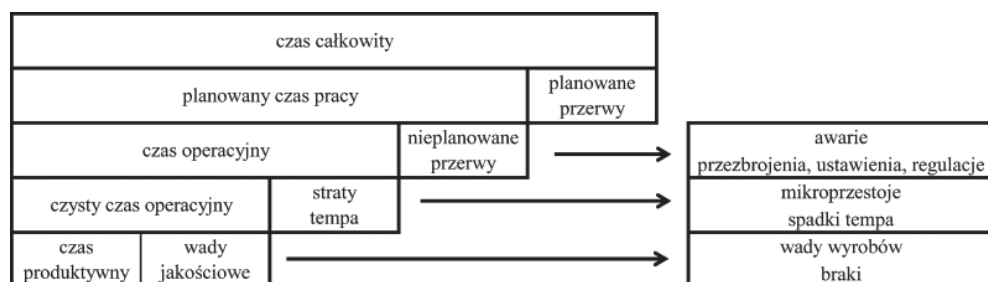


Rys. 4. Przykładowy dashboard pokazujący wyniki kolejnych symulacji oraz wyliczone na ich podstawie wskaźniki

W ramach obserwowanych poziomów wskaźnika OEE wylapuje się wiele rodzajów strat, które mają wpływ na poszczególne jego składowe. Na zniżanie wartości dostępności będą

miały wpływ przede wszystkim nieplanowane przerwy na stanowisku pracy, natomiast na wydajność procesu najbardziej wpłyną wszystkie straty związane z nieodpowiednim, zbyt niskim tempem produkcji. Wady wyrobów mają natomiast kluczowe znaczenie w przypadku trzeciej składowej wskaźnika, a więc jakości. Powyższe elementy przedstawiono obrazowo na rysunku 5.

Obok miary efektywności stanowiska pracy w ujęciu operacyjnym powinno się także liczyć poziomy kosztów związanych z produkcją.



Rys. 5. Zależności między rodzajami czasów w produkcji oraz głównymi możliwymi w nich stratami

Źródło: [8]

Każda runda symulacyjna AGH LeanLine rozpoczyna się od ustalenia parametrów początkowych, które w połączeniu z danymi z odczytów NFC (czasy zejścia kolejnych sztuk wyrobów ze stanowisk roboczych) pozwalają wyznaczyć wynik finansowy, a więc poziom generowanego zysku lub straty [9]. Na rysunku 6 przedstawiono przykładowy wynik finansowy uzyskany w jednej z przeprowadzonych symulacji produkcyjnych.

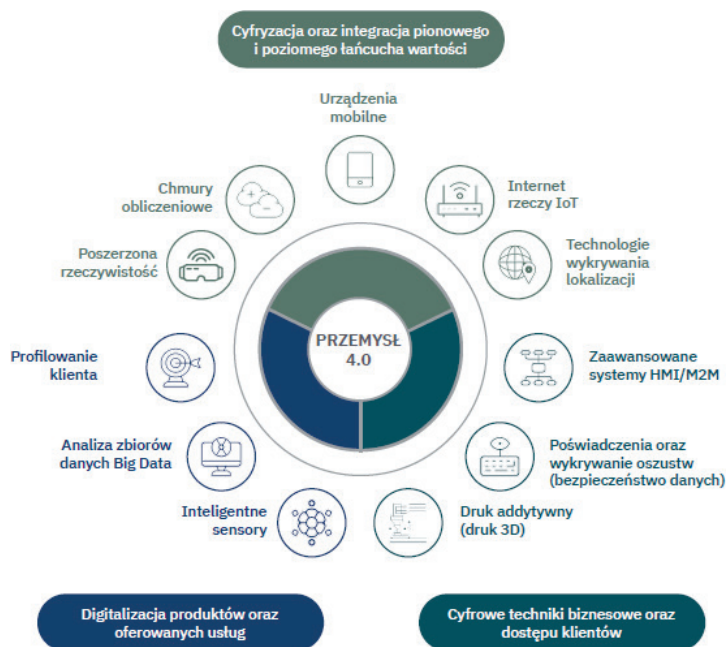
Wynik finansowy	
Metryka	Łącznie (zł)
Przychód ze sprzedaży	300 000
Pozostałe przychody	4
PRZYCHODY CAŁKOWITE	300 004
Koszty surowców	6
Koszty zapasów	1
Koszt pracy	2640
Koszty transportu (do klienta)	7
Pozostałe koszty	0
KOSZTY CAŁKOWITE	2654
ZYSK (P-K)	297 350

Rys. 6. Fragment raportu prezentujący wynik finansowy po pierwszej symulacji produkcyjnej

Źródło: [9]

3. CYFRYZACJA SPOSOBEM NA PODWYŻSZENIE EFEKTYWNOŚCI PRODUKCJI

Pojęcie Przemysł 4.0 powstało w 2011 roku i jest utożsamiane przede wszystkim z systemami cyberfizycznymi, internetem rzeczy, sieciami czujników, zaawansowaną automatyką, chmurą obliczeniową, *big data*, cyfrowymi bliźniakami czy też uczeniem maszynowym i innymi. Powyższe kwestie zestawiono na rysunku 7. Definicje Przemysłu 4.0 na ogół są ze sobą spójne i poruszają zarówno aspekty technologiczne, jak i procesowe. Czwarta rewolucja przemysłowa, z którą często utożsamia się pojęcie Przemysł 4.0, jest określana jako koncepcja procesu transformacji, zarówno technologicznej, jak i organizacyjnej przedsiębiorstwa, łącząca ze sobą łańcuch wartości, a także nowe modele biznesowe oraz cyfryzację [10, 11].



Rys. 7. Definicja Przemysłu 4.0 oparta na nowoczesnych technologiach

Źródło: [10]

Warto zadać pytanie, co zatem przemawia za transformacją cyfrową w firmach produkcyjnych. Odpowiedzi dostarcza badanie ankietowe przeprowadzone na reprezentatywnej grupie 197 firm z sektora motoryzacyjnego, którego wyniki procentowe pokazano na rysunku 8. Ważne w jego ujęciu jest to, że odpowiedzi ze wskazaniem większym bądź równym 40% odnoszą się w sposób pośredni lub bezpośredni do wskaźnika OEE. Zwiększenie poziomu OEE jest bowiem czynnikiem decydującym o wdrażaniu tego typu rozwiązań. W czołowej odpowiedzi przedsiębiorcy wskazują także wzrost produkcji i zwiększanie jakości, a to również odnosi się do jakości i wydajności, które są składowymi OEE. Wyciągając

wnioski z niektórych wskaźników efektywności finansowej, należy uznać, że minimalizacja kosztów (zadeklarowało ją 43% ankietowanych) powinna być nieodzownym działaniem poprzedzającym liczenie wskaźnika efektywności.



Rys. 8. Czynniki sprzyjające transformacji cyfrowej w firmach z branży motoryzacyjnej

Źródło: [12]

W przytaczanym badaniu postanowiono również zapytać o główne przyczyny hamujące transformację cyfrową w przedsiębiorstwach produkcyjnych. Uzyskane wyniki zestawiono na rysunku 9. Czynniki decydującymi o niepodejmowaniu działań implementacyjnych w zakresie cyfryzacji produkcji, które uzyskały największy odsetek odpowiedzi, są: brak wystarczającej wiedzy o nowych technologiach, brak umiejętności zarządzania nimi czy też niechęć pracowników do zmian.



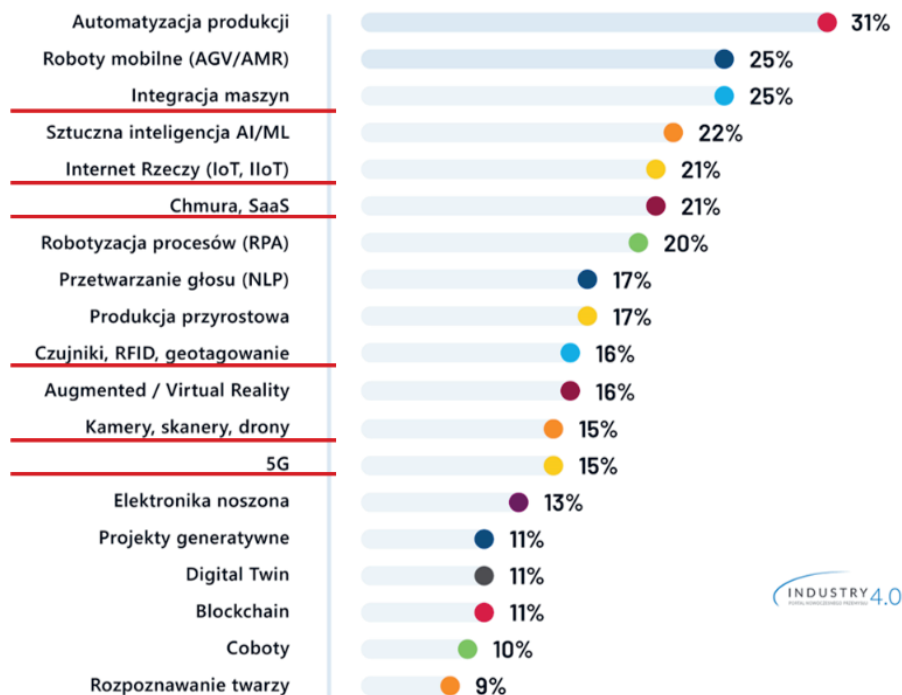
*) Technologie - w badaniu jest mowa o "technologiach Smart Manufacturing"



Rys. 9. Czynniki hamujące transformację cyfrową w firmach z branży motoryzacyjnej

Źródło: [12]

Trzecia część prezentowanego badania dotyczyła wskazania technologii realizujących koncepcje Przemysłu 4.0, które zapewniają największy zwrot z inwestycji. Wyniki w postaci wskazań procentowych na poszczególne stosowane technologie pokazano na rysunku 10. W ich kontekście ważne jest to, że niektóre ze wskazań przedsiębiorstw, takie jak: internet rzeczy, integracja maszyn, chmura, czujniki, RFID, kamery, sieć 5G, są technologiami wdrożonymi w Laboratorium Inżynierii Produkcji i Jakości AGH, a więc w LeanLab, bądź planowanymi do implementacji w nim w niedalekiej przyszłości.



Rys. 10. Technologie zapewniające największy zwrot z inwestycji

Źródło: [12]

4. OBECNY ORAZ PLANOWANY POZIOM CYFRYZACJI I AUTONOMIZACJI AGH LEANLINE

W początkowej fazie, w 2019 roku, projekt AGH LeanLine opierał się na konstrukcjach wykonanych z programowalnych klocków lego Mindstorms EV3. Obecnie AGH LeanLine wykorzystuje również elementy specjalnie zaprojektowanych i wykonanych, z pomocą dr. hab. inż. Pawła Bogacza, prof. AGH, i dr inż. Katarzyny Styk, przez studentką grupę roboczą ze Studenckiego Koła Naukowego „Zarządzanie”, drewnianych pochylni transportowych, systemu zintegrowanych czytników NFC, systemu komunikacji kompatybilnego z tablicą Vorne 800XL oraz zaawansowanego technologicznie systemu autonomicznej inspekcji

wizualnej cech jakościowych końcowej kontroli jakości w postaci kamery SmartCamera firmy Balluff. Wszystkie powyższe elementy wdrożono w 2020 roku. W 2021 roku firma Amister stworzyła przeznaczone specjalnie dla projektu AGH LeanLine rozwiązanie gromadzące, niemalże w czasie rzeczywistym, informacje z aktualnego statusu symulowanego procesu produkcyjnego [9]. Dzięki tak przygotowanemu oprogramowaniu możliwa jest prezentacja pobieranych danych na schemacie, zapisywanie historii odczytów, a także w konsekwencji możliwość wykonywania dynamicznych kalkulacji wskaźników skuteczności i efektywności procesu produkcyjnego [9].

Opisana powyżej instalacja urządzeń wykorzystujących technologię komunikacji bliskiego zasięgu (*near-field communication*) i budowa odpowiedniego systemu analitycznego pozwoliły na automatyczne gromadzenie danych z przebiegu każdej symulacji.

Plany dotyczące rozbudowy w 2024 roku projektu AGH LeanLine w obszarze automatyzacji, robotyzacji i autonomizacji dotyczą przede wszystkim zastąpienia obecnych lego Mindstorms EV3 bardziej czułymi, wydajnymi i kompatybilnymi modułami deweloperskimi IoT M5Stack, które od mniej więcej dwóch lat są technologią stosowaną na skalę przemysłową. M5Stack jest wielowymiarowym systemem analityki produkcji umożliwiającym tworzenie wysokiej jakości prototypów sensorycznych na poziomie przemysłowym [13, 14]. Przykładowy wygląd modułu M5Stack wraz niektórymi akcesoriami przedstawiono na rysunku 11.



Rys. 11. Moduł deweloperski IoT M5Stack z czytnikiem RFID oraz przyciskiem

Źródło: [13]

Do najważniejszych zalet funkcjonalnych modułów deweloperskich M5Stack można zaliczyć [13]:

- łatwość w programowaniu,
- prostotę w użytkowaniu,
- niewielkie wymiary modułów,
- szeroki wybór peryferiów – czujników,
- możliwość budowy urządzeń komunikujących się przez wi-fi i bluetooth,
- szybki czas transferu danych z czujników,
- dostępność wielu różnych form mikrokontrolerów w zależności od potrzeby zastosowania,
- różne standardy transferu danych,
- możliwość integracji modułów między sobą i z innymi systemami,
- stosowanie na skalę przemysłową.

Poza tym warto także zwrócić uwagę na duże możliwości modułów deweloperskich IoT pod względem wykorzystania w systemach z nich stworzonych wielu różnorodnych czujników. Możliwe jest z tego powodu podłączenie do wielowymiarowego systemu analityki danych M5Stack czujników rejestrujących np. różne właściwości wytwarzanych produktów czy też ruchy operatorów. W przedsiębiorstwach produkcyjnych stawiających na technologie Przemysłu 4.0 nie może zabraknąć sieci czujników. Wśród najczęściej stosowanych w maszynach lub na stanowiskach roboczych można wymienić czujniki: zbliżeniowe, pojemnościowe, temperatury, optyczne, ultradźwiękowe, ciśnienia i tensometryczne [15]. Powyższe rozwiązanie proponowane przez M5Stack wychodzi więc naprzeciw tym kwestiom.

Przeprowadzono wstępne testy technologii M5Stack w Laboratorium Inżynierii Produkcji i Jakości AGH, które pozwoliły na porównanie wybranych czasów raportowanych podczas symulacji (operacyjny i przebrojenia) przed zastosowaniem nowych modułów oraz po ich wstępnej implementacji. Wyniki porównawcze w sekundach przedstawiono w tabeli 2. Podano w niej też uzyskane korzyści w postaci czasowej po zastosowaniu nowej aparatury w skali procentowej. Jak można zaobserwować, czasy międzyoperacyjne, które związane są z przejściem produktu z jednego stanowiska na kolejne, dzięki zaimplementowaniu nowego rozwiązania uległy skróceniu o 40%, natomiast całkowity czas dostosowania systemu do symulacji zredukowano o ponad 91%. Skrócenie przytoczonych czasów wpłynęło w sposób bezpośredni na wartość składowej wskaźnika OEE, którą jest wydajność.

Tabela 2. Zestawienie osiągniętych czasów produkcyjnych [s] przed cyfryzacją i po cyfryzacji

Charakterystyka	Przed cyfryzacją	Po cyfryzacji
Średni czas przejściowy produktu z jednego stanowiska na kolejne	5	3
Suma czasów międzyoperacyjnych	25	15
Zysk całkowity (czasy międzyoperacyjne)	10 (40%)	
Czas przebrojenia (przygotowanie systemu do symulacji)	3600	300
Zysk całkowity (czas dostosowania systemu do symulacji)	3300 (91,6%)	

Zredukowanie czasu przebrojenia – przygotowania środowiska do symulacji przełoży się również na zwiększenie wskaźnika dostępności, ponieważ stanowiska robocze będą mogły w znacznie krótszym czasie zostać przygotowane i być w stanie gotowości do rozpoczęcia „produkcji”, zwłaszcza w zaawansowanych rundach symulacyjnych, gdzie raportuje się czasy międzyoperacyjne z czujników NFC.

Reasumując, należy zauważyć, że wdrożenie nowej technologii pozwoli, zdaniem autora, na docelowe podniesienie poziomu efektywności procesowej. Wiąże się to z:

- skróceniem czasów operacyjnych – znaczące różnice pomiędzy czasami potrzebnymi na bardzo dokładne zbliżenie czytników NFC (tak jak to jest obecnie) a czasami po wprowadzeniu M5Stack; zarejestrowane czasy przejściowe produktu pomiędzy stanowiskami ulegną skróceniu na skutek przesuwania czytników ze stanowiska na stanowisko przy użyciu bardziej dokładnej i precyzyjnej aparatury tej technologii;
- zwiększeniem stabilności procesu na skutek wprowadzenia dokładniejszych czujników rejestrujących zejścia kolejnych wytworzonych produktów ze stanowisk pracy;
- redukcją czasu przygotowania systemu do symulacji produkcji (czas przebrojenia) o około 92% z kilkudziesięciu do kilku minut;
- możliwością rzeczywistej oceny wydajności procesu produkcyjnego i na tej podstawie wprowadzaniu rozwiązań podnoszących wartości składowe wskaźnika OEE.

W tabeli 3 zestawiono możliwe do osiągnięcia w wyniku cyfryzacji AGH LeanLine efekty optymalizacyjne związane z poszczególnymi składowymi OEE.

Tabela 3. Wpływ efektów digitalizacji AGH LeanLine na składowe wskaźnika OEE

Skutek digitalizacji AGH LeanLine	Składowa wpływu OEE
Skrócenie czasów międzyoperacyjnych	wydajność
Redukcja czasu przygotowania systemu do symulacji produkcji (czas przebrojenia)	wydajność, dostępność
Zwiększenie stabilności procesu	wydajność, dostępność
Możliwość rzeczywistej oceny efektywności procesu produkcji	wydajność, dostępność, jakość

5. PODSUMOWANIE

Mimo wielu niepewności dostrzeganych w światowej gospodarce transformacja cyfrowa postępuje, a trend ten jest stabilny i zyskuje znaczenie głównie w aspekcie wykorzystania danych i oprogramowania oraz autonomizacji w procesach produkcyjnych.

W niniejszym artykule przedstawiono technologię realizującą koncepcję Przemysłu 4.0, która będzie wdrożona w ramy metodyczne projektu AGH LeanLine. Wykazano, że opisane w nim moduły deweloperskie M5Stack mogą mieć zastosowanie optymalizacyjne w tym projekcie. Zostało to potwierdzone przez wyniki przeprowadzonych testów, na których podstawie można było wyciągnąć wnioski o możliwości skrócenia czasów międzyoperacyjnych o 40% i czasów przebrojenia o aż 92%. Realizacja tego celu było możliwa dzięki

uprzedniemu scharakteryzowaniu pojęć dotyczących monitorowania efektywności produkcji czy też terminów odnoszących się do Przemysłu 4.0, a także odniesieniu kontekstu artykułu do najnowszych badań z zakresu podejścia przedsiębiorstw do podejmowania działań implementacyjnych w obszarach digitalizacji i autonomizacji. Sformułowano kilka wniosków szczegółowych:

- Dzięki cyfryzacji produkcji możliwe jest podnoszenie poziomów składowych wskaźnika efektywności procesowej OEE, a w konsekwencji również wartości jego samego. Należy przy tym jednak pamiętać, że procesy transformacji cyfrowej w przedsiębiorstwach produkcyjnych mają za zadanie przyspieszyć i wzmocnić działania ludzi, dostarczając im informacji w czasie rzeczywistym. Bez równorzędnych działań w zakresie optymalizacji organizacyjnej i procesowej, np. wdrażania metod i narzędzi *lean manufacturing*, nie jest możliwe osiągnięcie powyższych celów digitalizacji.
- Cyfryzacja procesów produkcyjnych wpływa przede wszystkim na zwiększenie szybkości przepływu informacji, co bezpośrednio podnosi wydajność produkcji.
- Cyfryzacja procesów produkcyjnych podnosi poziom elastyczności produkcji, stabilności procesowej, dostępności stanowisk roboczych oraz wpływa pozytywnie na wartość wykorzystania zasobów i poziom redukcji strat produkcyjnych.
- Tempo rozwoju koncepcji Przemysłu 4.0 jest w dużej mierze podyktowane dynamicznym rozwojem i dostępnością na rynku inteligentnych czujników wyposażonych w moduły komunikacyjne, umożliwiające podłączenie ich do sieci cyfrowych.

LITERATURA

- [1] Parmenter D., *Kluczowe wskaźniki efektywności (KPI): tworzenie, wdrażanie i stosowanie*, Wydawnictwo Onepress, Gliwice 2016.
- [2] Ostapko B., *Organizacja kluczowych wskaźników efektywności w przedsiębiorstwie*, Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, Seria: Organizacja i Zarządzanie, z. 131, 2018, s. 407–418.
- [3] Koliński A., *Przegląd metod i technik oceny efektywności procesu produkcyjnego*, Logistyka, nr 5, 2011, s. 1083–1091.
- [4] Akademia Jakości, *OEE – wskaźnik efektywności wykorzystania maszyn i urządzeń*, <https://akademijakosci.com/oe/> [dostęp: 15.02.2024].
- [5] Murdzek M., Richert M., Hubicki R., *Wskaźnik efektywności OEE w systemie produkcji gniazdowej*, [w:] Dudek M. (red.), *Nowoczesne metody i narzędzia w inżynierii produkcji i zarządzaniu*, Wydawnictwa AGH, Kraków 2021, s. 19–128.
- [6] ANT Solutions, *Jak dostępność maszyn wpływa na OEE i w jaki sposób można ją zwiększyć?*, PolskiPrzemysł, 28.03.2023, <https://polskiprzemysl.com.pl/utrzymanie-ruchu/co-to-jest-wskaznik-oe/> [dostęp: 15.02.2024].
- [7] Bartecki K., Król D., Skowroński J., *Wyznaczenie kluczowych wskaźników wydajności procesu produkcyjnego – część I: badania teoretyczne*, Pomiary – Automatyka – Robotyka, r. 22, nr 3, 2018, s. 5–13, https://doi.org/10.14313/PAR_229/5.
- [8] Stecula K., *Wykorzystanie modelu OEE do wyznaczania efektywności maszyn*, Zarządzanie Przedsiębiorstwem – Polskie Towarzystwo Zarządzania Produkcją, nr 2, 2016, s. 27–33.

- [9] Konefał A., Styk K., Bogacz P., *Wykorzystanie technologii NFC na przykładzie projektu edukacyjnego AGH LeanLine*, [w:] Osojca-Kozłowska S. (red.), *Ekonomia i zarządzanie w teorii i praktyce*, Wydawnictwo Naukowe ArchaeGraph, Łódź–Kielce 2021, s. 23–39.
- [10] Baranowski M., Kordowska M., Pisarek J., Ziemacki Z., Hetmańczyk M., Pollak A., *Przemysł 4.0: identyfikacja trendów technologicznych*, Narodowe Centrum Badań i Rozwoju, Warszawa 2023, <https://www.gov.pl/web/ncbr/przemysl-40-identyfikacja-trendow-technologicznych> [dostęp: 15.02.2024].
- [11] Kiełtyka L., Charciarek K., *Model zarządzania procesowego z wykorzystaniem nowoczesnych narzędzi Przemysłu 4.0*, Przegląd Organizacji, nr 8, 2019, s. 5–12, <https://doi.org/10.33141/po.2019.08.01>.
- [12] Rockwell Automation, *8th Annual State of Smart Manufacturing Report*, <https://www.rockwellautomation.com/en-us/capabilities/digital-transformation/state-of-smart-manufacturing.html> [dostęp: 11.12.2023].
- [13] M5Stack, <https://m5stack.com/> [dostęp: 15.02.2024].
- [14] Conrad, *M5Stack K016-P Mikrokontroler M5Stack*, <https://www.conrad.pl/pl/p/m5-stack-k016-p-mikrokontroler-m5stack-2380024.html> [dostęp: 15.02.2024].
- [15] Poreda R., *5 elementów rewolucji IoT w przemyśle 4.0*, Biznes i Produkcja, 18.06.2020, <https://www.astor.com.pl/biznes-i-produkcja/5-elementow-rewolucji-iot-w-przemysle-4-0/> [dostęp: 15.02.2024].

Zbigniew Jan Ziarek*

NARZĘDZIE GEOEDUKACYJNE NA POTRZEBY GEOTURYSTYKI – STUDIUM SEDYMENTOLOGICZNEGO MODELOWANIA PRĄDU ZAWIESINOWEGO

Narzędzia geoedukacyjne ułatwiają dostrzeganie georóżnorodności w krajobrazie i elementach pojedynczego geostanowiska oraz uwrażliwiają odbiorcę na walory poznawcze i estetyczne. Skuteczność narzędzia geoedukacyjnego oparta jest na geointerpretacji, a samo narzędzie kierowane do geoturysty. Prezentowane narzędzie służy do zobrazowania procesów zasilania, transportu i sedymentacji materiału z prądu zawiesinowego, przy udziale którego powstaje turbidyt (jeden z rodzajów utworów fliszowych budujących Karpaty zewnętrzne). Zostało ono oparte na koncepcji sedymentologii procesowej obejmującej: (a) opis faktograficzny produktu, (b) interpretację procesu tworzenia, (c) konstrukcję ogólnego modelu niesprzecznego z obserwowanym zapisem skalnym – „od szczegółu do ogółu”. Realizacja projektu pozwoliła określić główne atrybuty narzędzia geoedukacyjnego: czytelność eksperymentu, jego wyrazistość, spektakularność, naturalizm i realizm. Dzięki nim odbiorca może poznać i zrozumieć zagadnienia dotyczące: naturalnego basenu sedymentacyjnego, punktowego zasilania zbiornika morskiego materiałem klastycznym, prądu zawiesinowego jako przykładu spływu grawitacyjnego osadu oraz modelu sedymentacji fliszowej w formie głębokomorskiego stożka.

THE GEOEDUCATIONAL TOOL FOR GEOTOURISM – A STUDY OF SEDIMENTOLOGICAL MODELING OF TURBIDITY CURRENT

A geoeducational tool is a common solution used to popularize knowledge about Earth Sciences. It facilitates the recognition of geodiversity in the landscape and the elements of individual geosites, sensitizing the audience to cognitive and aesthetic values. The effectiveness of the tool is based on a skilful geointerpretation. The target audience are geotourists. The goal of the presented geoeducational tool is to illustrate the processes of material feeding, transport, and sedimentation from a turbidity current, which contributes to the formation of turbidites (one of the types of flysch deposits that build the Outer Carpathians). The designed tool is based on the concept of process sedimentology: (a) factual description of the product, (b) interpretation of the creation process, (c) construction of a general model consistent with the observed rock record – „from detail to general.” The implementation of the project allowed for the determination of the main attributes of the geoeducational tool: experiment clarity, expressiveness, spectacularity, naturalism, and realism. Thanks to these attributes, the recipient is able to learn and understand issues related to the natural sedimentary basin, point- source feeding of the basin with clastic material, turbidity current as an example of sediment gravity flow, and the model of flysch sedimentation in the form of a submarine fan.

* AGH Akademia Górniczo-Hutnicza, Wydział Geologii, Geofizyki i Ochrony Środowiska, Koło Naukowe „Geoturystyka”, Studenckie Koło Naukowe Kartografii Geologicznej i Komputerowej „Azymut”.

1. WPROWADZENIE

Celem projektu było stworzenie narzędzia w postaci filmu geoedukacyjnego z treścią geointerpretacyjną dotyczącą wybranego zagadnienia sedimentologicznego. Inspiracją do przeprowadzenia serii modelowań procesów sedimentacyjnych były pierwsze obserwacje terenowe autora poczynione w ramach zajęć terenowych w odsłonięciach fliszu karpackiego, wizyta w laboratorium sedimentologicznym Katedry Geologii Ogólnej i Geoturystyki WGGiOŚ AGH w Krakowie (rys. 1) [1], nad którym opiekę sprawują dr inż. Wojciech Mastej i dr inż. Tomasz Bartuś [2], a także modelowania sedimentacji przeprowadzone w tej pracowni przez Panów prof. Janusza Kotlarczyka i dra inż. Krzysztofa Pasierbiewicza [3].

Projekt narzędzia geoedukacyjnego oparto na idei geoedukacji, czyli popularyzacji wiedzy geologicznej przez przekazywanie informacji o obiektach przyrody nieożywionej i/lub procesów odpowiedzialnych za ich genezę, uznawanych za turystycznie atrakcyjne [4–9]. Narzędzie miało za zadanie zaprezentować i wyjaśnić naturę procesów sedimentacyjnych odpowiedzialnych za powstanie utworów prądów zawieszinowych, czyli turbidytów – reprezentujących jeden z rodzajów fliszu budującego Karpaty zewnętrzne (tzw. Karpaty fliszowe) [10–15].

Do realizacji zadania konieczne było zaprojektowanie i uruchomienie własnego studenckiego minilaboratorium sedimentologicznego (rys. 2), które następnie posłużyło jako „poligon doświadczalny”. Dzięki niemu osiągnięto cel geoedukacyjny, na który złożyły się wymienione poniżej geoturystyczne i geologiczne zadania.



Rys. 1. Laboratorium sedimentologiczne KGOiG WGGiOŚ AGH (fot. Z. Ziarek)



Rys. 2. Minilaboratorium sedimentologiczne, od lewej: R. Szczęch, P. Strzeboński, M. Pawlak, J. Andrzejak, J. Szydłowski, autor na pierwszym planie (fot. Z. Ziarek)

Zadania geoturystyczne:

- zaprezentowanie odbiorcy wyglądu hipotetycznego zbiornika morskiego, w którym powstawał jeden z rodzajów skał (turbidyty) budujących Karpaty fliszowe,
- pokazanie odbiorcy procesów: zasilania, transportu i osadzania materiału klastycznego, tworzących turbidyty,
- propozycja geointerpretacji na poziomie wiedzy odbiorcy, który nie jest specjalistą,
- popularyzacja wiedzy geologicznej oraz promocja geoturystyki przez geoedukację.

Zadania geologiczne:

- zobrazowanie podwodnego środowiska formowania się turbidytów – czyli morskiego basenu sedimentacyjnego,
- uzyskanie naturalistycznej konfiguracji zbiornika: morfologii skłonu oraz dna oceanicznego,
- przedstawienie procesu turbulencji zawiesiny, transportu grawitacyjnego osadu, powstawania turbidytów oraz swobodnego opadania najdrobniejszych cząstek,
- uzyskanie rozprzestrzenienia materiału klastycznego w postaci „wachlarza” (forma stożka głębokomorskiego),
- uzyskanie uziarnienia frakcjonalnego normalnego (tzw. gradacji normalnej), czyli struktury, w której nagromadzenie grubiej klastycznego osadu (osadzanego najwcześniej) występuje w części dolnej turbidytu, a drobniej klastycznego – w jego części górnej.

2. ETAPY PROJEKTOWANIA NARZĘDZIA GEOEDUKACYJNEGO

Film (narzędzie geoedukacyjne) miał za zadanie zilustrowanie i wyjaśnienie odbiorcy, w jakim środowisku, za pomocą jakich procesów oraz z jakiego materiału powstały turbidyty osadów fliszowych. Kolejne etapy projektowania narzędzia geoedukacyjnego obejmowały:

- ustalenie przedmiotu, celu, metod i odbiorcy,
- zgromadzenie, uporządkowanie i ewentualne uzupełnienie wiedzy, stanowiącej bazę merytoryczną do projektu narzędzia geoedukacyjnego,
- wybór zagadnień i elementów, które będą prezentowane za pomocą narzędzia,
- projektowanie merytoryczne,
- projektowanie techniczne,
- testowanie narzędzia oraz wprowadzanie poprawek i uzupełnień,
- opracowanie filmu z objaśnieniami.

3. FLISZ KARPACKI – CHARAKTERYSTYKA

Przedmiotem analogowych modelowań sedymentologicznych były osady eksperymentalne mające w szerokim przybliżeniu odpowiadać turbidytom [16, 17] – jednemu z typów karpackich utworów fliszowych (rys. 3) [10, 12–15].



Rys. 3. Flisz karpacki z turbidyty – odsłonięcie w Żegocinie (fot. Z. Ziarek)

Sedymentacja w zewnętrznokarpackich subbasenach przebiegała w zróżnicowanych warunkach geotektonicznych, głębokościowych i różnej odległości od obszarów alimentacyjnych (źródłowych), z których pierwotnie dostarczany był terygeniczny materiał okruchowy – zatem flisz może być rozpatrywany w szerokim znaczeniu [10–15]:

- w ujęciu genetycznym jako zespół osadów głębokomorskich (pozaszelfowych), utworzony z materiału pochodzenia terygenicznego, powstały przy dominującym udziale spływów grawitacyjnych osadu (m.in. prądów zawieszinowych);
- w ujęciu litologicznym jako serie osadowe składające się z przeławicających się skał klastycznych o zróżnicowanej frakcji (psefitowej, psamitowej, aleurytowej i pelitowej) – najczęściej naprzemianległych piaskowców i łupków mułowcowych lub iłowcowych, którym mogą towarzyszyć osady gruboklastyczne (zlepienie);
- w ujęciu geotektonicznym: miększe (liczone w setkach, a nawet kilku tysiącach metrów) serie skał osadowych powstałe w pre- lub wczesnoorogenicznym etapie rozwoju basenów sedymentacyjnych (zamykania/zgniatania basenów, dźwignia i denudowania obszarów źródłowych).

4. SEDYMENTOLOGIA PROCESOWA

Metodykę badań oparto na założeniach sedymentologii procesowej [7, 9, 14, 16], której idea postępowania „od szczegółu do ogółu” obejmuje warunki konieczne, takie jak:

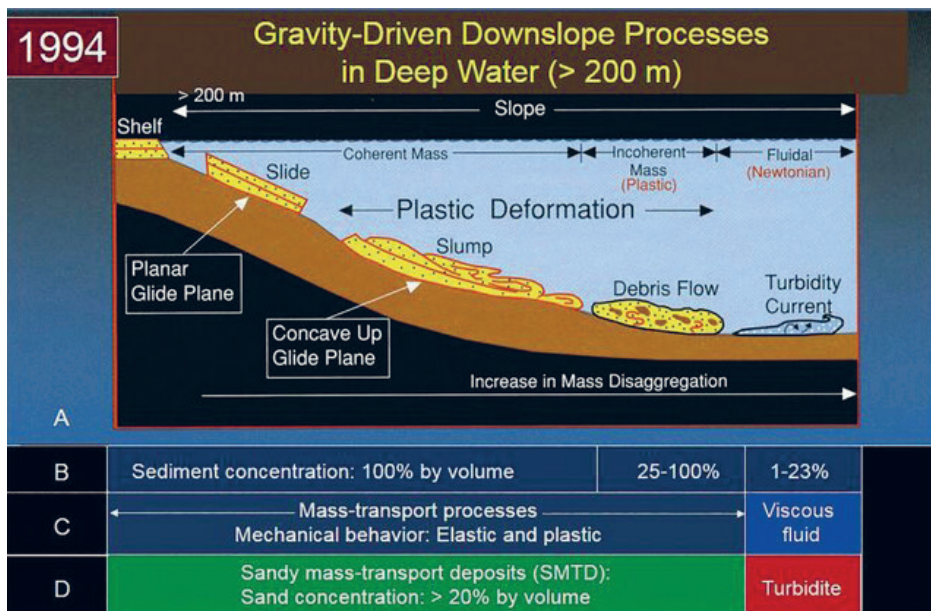
- szczegółowy opis wykształcenia produktu(ów), czyli charakterystyka cech litologiczno-sedymentologicznych, które można faktycznie zaobserwować (analiza faktograficzna);
- interpretację procesową, czyli dopasowanie możliwych mechanizmów transportowo-depozycyjnych do wykształcenia tychże produktów (analiza litologiczno-sedymentologiczna);
- założenie hipotetycznego modelu środowiskowo-depozycyjnego, które nie może być sprzeczne z faktami zebranymi na początku (zapis skalny) oraz ich interpretacją (szczegółową analizą teksturalno-strukturalną).

Model taki ma w prosty i czytelny sposób zobrazować zachodzące procesy geologiczne oraz pokazać ich produkty. Natomiast podczas modelowania zachowana musi być zgodność z rzeczywistością w takim stopniu przybliżenia, aby uzyskać możliwie najbardziej naturalistyczny obraz środowiska oraz warunki, w których analizowany proces i jego produkt mogłyby zaistnieć.

5. SPŁYWY GRAWITACYJNE OSADU

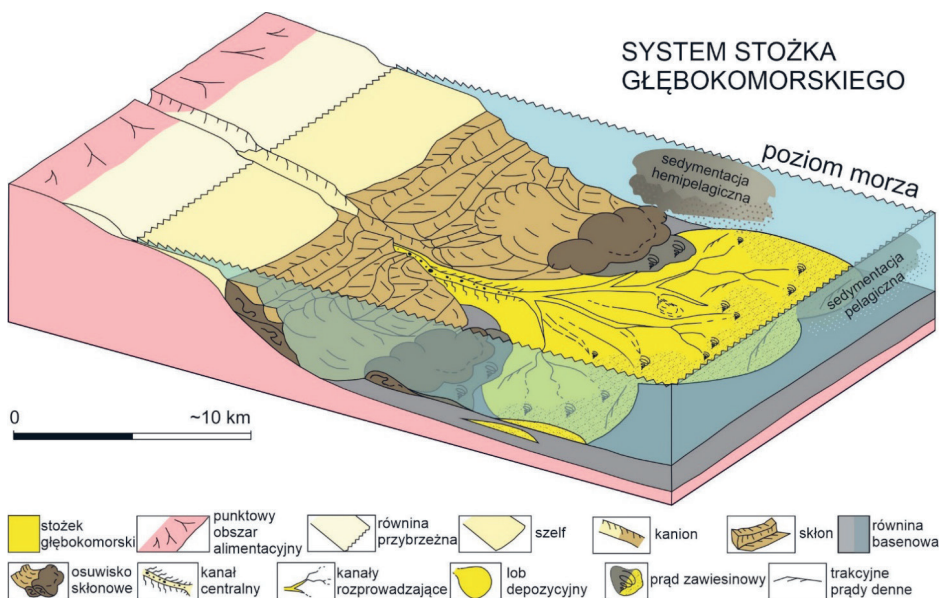
Istnieją różne spływy grawitacyjne osadów (rys. 4) [11, 14–17]: np. prądy zawieszinowe (rys. 5), których produktem są turbidyty (rys. 6) [9–17], czy spływy rumoszowe (kohezyjne i niekohezyjne) i ich produkty – debryty, których różne odmiany znane są np. z wielu odsłoneń skałek piaskowcowo-zlepieńcowych w Karpatach [7, 8, 14, 18, 19].

Głębokowodny prąd zawieszinowy to jeden z procesów grawitacyjnego transportu materiału klastycznego (jeden z typów spływów grawitacyjnych osadu), w którym podczas transportu dochodzi do turbulentnego mieszania osadu z otaczającą wodą (mechanizmem podtrzymującym przemieszczanie i utrzymywanie cząstek w zawieszeniu jest turbulencja).



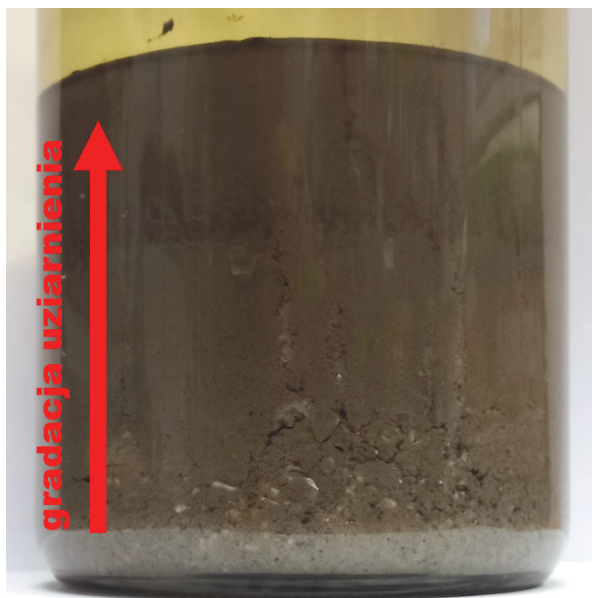
Rys. 4. Podmorskie spływy grawitacyjne

Źródło: [16]



Rys. 5. Model stożka głębokomorskiego

Źródło: opracowanie własne na podstawie [14]



Rys. 6. Model turbidyty uziarnionej frakcjonalnie normalnie (fot. Z. Ziarek)

Mieszanka osadu i wody tworząca niskoskoncentrowaną zawiesinę przemieszcza się grawitacyjnie za pośrednictwem turbulencji po skłonie i dnie basenu sedymentacyjnego. Turbulentna zawiesina stopniowo wytraca energię oraz prędkość i przechodzi od fazy erozyjnej (powstawanie m.in. jamek wirowych) do fazy depozycyjnej (grawitacyjna segregacja i powstawanie gradacji normalnej). Produktem tak rozumianego prądu zawiesinowego jest turbidyty o uziarnieniu frakcjonalnym normalnym, często z obecnymi na powierzchni spągowej odlewami jamek wirowych [11, 14].

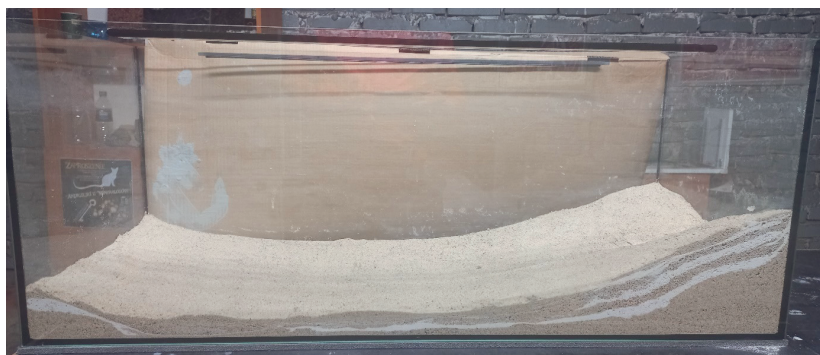
Utwory turbidytowe deponowane były głównie w dystalnej strefie basenu sedymentacyjnego (u podstawy skłonu i na równi basenowej) często w formie lobów depozycyjnych i ich obniżenia, tworzących razem z zasilającym kanałem centralnym, przechodzącym w rozgałęziające się kanały rozprowadzające, erozyjno-depozycyjny system głębokomorskiego stożka (rys. 5) [11, 14, 20].

6. POMYSŁ NA KONSTRUKCJĘ MINILABORATORIUM

Zamierzeniem autora było zrealizowanie filmu obrazującego mechanizm powstania (turbulencja) i rozwoju prądu zawiesinowego (transport i depozycja), a w konsekwencji tworzenia produktu (turbidyty). W tym celu należało stworzyć minilaboratorium naśladowujące naturalne środowisko, w którym zachodzą procesy sypływu turbulენტnej zawiesiny, depozycji uziarnionych frakcjonalnie normalnie turbidytyów oraz formowania podwodnego stożka napływowego.

W tym celu opracowano następujące elementy składowe narzędzia geoedukacyjnego (rys. 7):

- jako zbiornik basenu sedymentacyjnego wykorzystano napełnione wodą akwarium ($100\text{ cm} \times 40\text{ cm} \times 40\text{ cm}$),
- jako skłon kontynentalny – zmatowioną płytę z pleksiglasu,
- jako alternatywne dla płyty wypełnienie dna – piasek,
- jako punktowe źródło zasilania – rurę plastikową zakończoną lejkiem,
- jako mieszadło do przygotowania zawiesiny (mieszaniny wody z gliną rzeźbiarską w stosunku około 4:1) zastosowano wiertarkę z wiertłem łopatkowym.



Rys. 7. Akwarium będące modelem basenu sedymentacyjnego (fot. Z. Ziarek)

7. PROBLEMY DO ROZWIĄZANIA

Problemy, które napotkano podczas kolejnych prób modelowania prądu zawiesinowego, sklasyfikowano jako merytoryczne i techniczne.

Problemy merytoryczne:

- Jakie powinny być proporcje elementów morfologicznych w modelu basenu sedymentacyjnego, aby w ograniczonej wielkości zbiorniku możliwe było zaprezentowanie prądu zawiesinowego?
- Pod jakim kątem powinien być nachylony „skłon kontynentalny” modelu?
- Z jakiego materiału powinna zostać przygotowana zawiesina i jaka powinna być jej koncentracja objętościowa?
- Jaki zakres merytorycznej geointerpretacji powinien być zaproponowany?

Problemy techniczne:

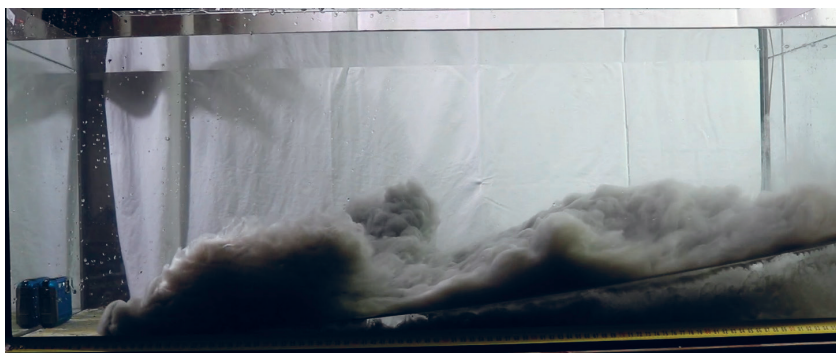
- Jak wprowadzić zawiesinę do akwarium?
- Z czego wykonać model skłonu kontynentalnego?
- Jakie ujęcia kamer zastosować?
- W jaki sposób oświetlić akwarium?
- Czy wprowadzić tło imitujące naturalne warunki środowiskowe, a jeśli tak, to jakiego powinno być rodzaju?

Zastosowano akwarium o znacznie większej długości niż szerokości ($100\text{ cm} \times 40\text{ cm} \times 40\text{ cm}$), stanowiące przestrzeń dla modelu basenu sedymentacyjnego (rys. 7).

Model skłonu kontynentalnego początkowo został wykonany z płyty pleksiglasowej, zmatowionej na jednej powierzchni papierem ściernym w celu zwiększenia tarcia, na której naklejono piasek. Podobnie wykonano część odzwierciedlającą dno basenu. Na brzegi płyty imitującej skłon nałożono uszczelkę, zapobiegającą ślizganiu się płyty po dnie akwarium. Kąt nachylenia skłonu był regulowany.

W celu uzyskania bardziej naturalistycznego efektu modelu dna oceanicznego usypano go z piasku w dwóch kolorach, co oprócz odwzorowania morfologii miało symbolizować uławicenie. Dodatkowo zamarkowano warstwowanie typu sigmoidalnego, podkreślające morfologię skłonu. W części skłonowej wyprofilowano podłużny rowek mający odpowiadać kanałowi centralnemu, aby skanalizować punktowe rozprowadzanie i punktowe ujście prądu zawiesinowego.

W pierwszej fazie prób modelowania, jako materiału do utworzenia zawiesiny spływu użyto tzw. gliny rzeźbiarskiej. Używano wtedy samego iłu illitowego, który w zależności od wpuszczonej do akwarium ilości i koncentracji różnie się zachowywał (maksymalną ilość i koncentrację wyznaczono eksperymentalnie) (rys. 8). Przykładowo zbyt duża ilość wprowadzonej zawiesiny powodowała odbijanie prądu od przeciwległej szyby akwarium i zmianę jego kierunku albo brak wytworzenia prądu turbulentnego przy zbyt dużej koncentracji (około 30% obj.), co skutkowało powstaniem kohezyjnego spływu bez turbulencji. Przy koncentracji powyżej 40% nie doszło do rozprzestrzenienia zawiesiny – podczas wprowadzenia zawiesiny powstały kohezyjne „kluchy” (rys. 9). W finalnej próbie użyto mieszaniny iłu kaolinitowego z pyłem kwarcowym. Za pomocą wiertarki i mieszadła przygotowano zawiesinę osadu i wody o koncentracji objętościowej około 23%. Pozwoliło to na uzyskanie rozdzielenia grawitacyjnego połączonych w zawieszinie osadów i uzyskanie efektu uziarnienia frakcjonalnego normalnego (grubszy pył kwarcowy na dole, a drobniejszy ił na górze). Odpowiednia ilość zawiesiny powodowała, że prąd nie odbił się, tylko spokojnie wytracił energię i osadził materiał w formie wachlarzowego stożka.



Rys. 8. Turbulentny prąd zawiesinowy (zawiesina z iłem illitowym o koncentracji objętościowej około 23%) – początkowe próby nieskanalizowanego (niepunktowego / na całej szerokości) modelowania na sztucznym pleksiglasowym skłonie (fot. Z. Ziarek)



Rys. 9. Z zawiesiny o zbyt dużej koncentracji objętościowej (około 40%) nie udało wytworzyć się prądu zawiesinowego – powstały tzw. kluchy (fot. Z. Ziarek)

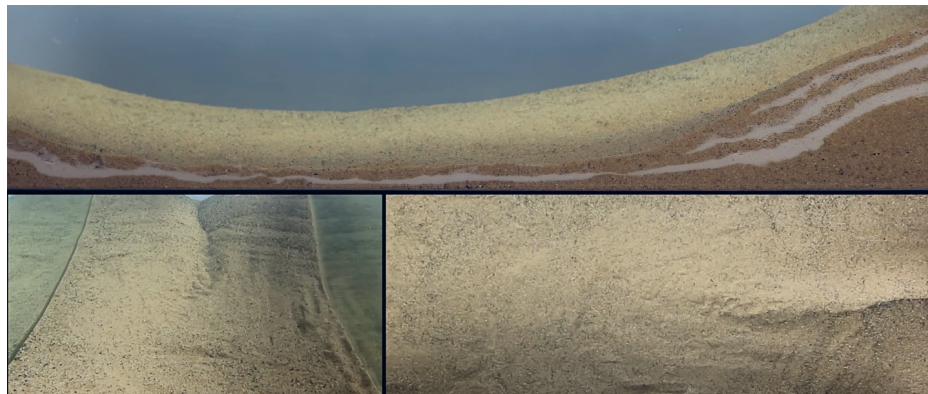
Aby model był jak najbardziej realistyczny, zastosowano punktowe źródło zasilania. W tym celu zawiesinę wprowadzono do akwarium na początek „kanału centralnego” przez rurę PCV (40 mm) z lejkiem na górze do łatwiejszego dozowania zawiesiny.

Przy pierwszych próbach filmowania modelowań (rys. 10) zwrócono uwagę na konieczność mocnego i równomiernego oświetlenia oraz zastosowania bardziej profesjonalnego tła, którym było dotychczas zwykłe, białe prześcieradło.



Rys. 10. Przygotowania do pierwszych modelowań.
Od lewej: J. Zasadni, P. Siwek, Z. Ziarek, J. Szydłowski, P. Strzeboński (fot. Z. Ziarek)

W finalnym produkcie zastosowano profesjonalne oświetlenie i tło ekranowe oraz sprawdzone wcześniej filmowanie z trzech ujęć kamer: od frontu, z boku i z góry (rys. 11).



Rys. 11. Przygotowany model basenu sedymentacyjnego (fot. K. Kulik)

8. NARZĘDZIE GEOEDUKACYJNE – FILM

Na etapie obróbki cyfrowej materiału filmowego dołożone zostały elementy „teatralności”: zmontowano obraz z trzech ujęć w spójną chronologicznie wizualizację procesu turbulentnego spływu grawitacyjnego oraz dołożono realistyczny pejzaż; ponadto wydzielono fragment ekranu na potrzeby wprowadzenia geointerpretacyjnych treści (rys. 12).



Rys. 12. Prąd zawiesinowy – ujęcie z trzech kamer (fot. K. Kulik)

Analizując końcową wersję finalnego produktu – filmu, dokonano podziału elementów tego narzędzia geoedukacyjnego na:

- elementy statyczne – basen, skłon, kanał centralny,
- elementy dynamiczne – turbulentny prąd zawieszinowy,
- geointerpretację – zakres i merytoryczny poziom treści geoedukacyjnej.

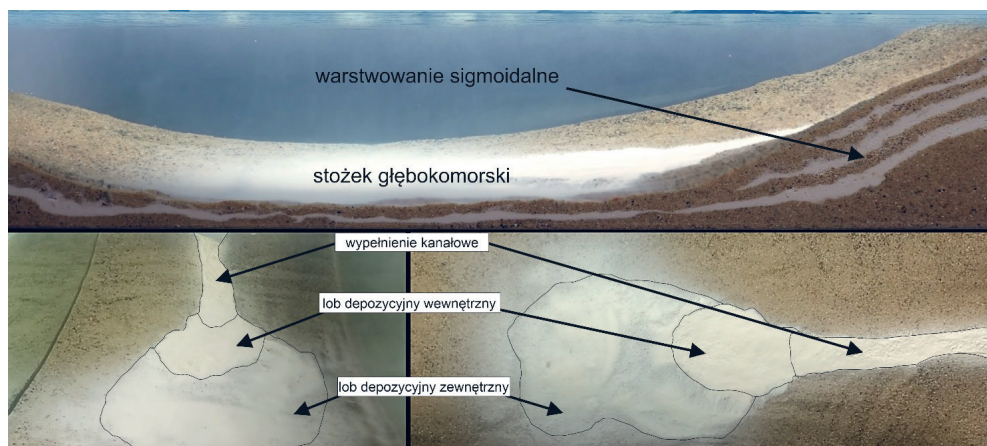
Projektowanie i konstruowanie narzędzia geoedukacyjnego pozwoliły ustalić najważniejsze cechy takiego narzędzia, którymi są:

- wyrazistość eksperymentu modelowania – sugestywność cechy,
- czytelność – ułatwienie zrozumienia,
- naturalizm – naśladowanie rzeczywistości,
- realizm – zgodność z obserwacjami, odtwarzanie rzeczywistości,
- spektakularność – wywarcie dużego wrażenia na odbiorcy,
- „teatralność” – sztuczność wywołująca konkretne wrażenie,
- powtarzalność – otrzymanie takiego samego wyniku w tych samych warunkach i przy tych samych parametrach.

9. WNIOSKI

Przeprowadzone fizyczne modelowania sedymentologiczne prądów zawieszinowych w poszukiwaniu analogii procesowej dla genezy turbidytów fliszu karpackiego, celem stworzenia narzędzia geoedukacyjnego, pozwoliły na sformułowanie następujących wniosków.

- Tworzenie narzędzia geoedukacyjnego wymaga przygotowania merytorycznego na znacznie wyższym poziomie niż później prezentowane i objaśniane odbiorcy treści (szczegółowe studia literaturowe, obserwacje, badania terenowe itp.).
- Dopracowanie narzędzia wymaga wielu powtórzeń opartych na metodzie prób i błędów, pozwalających ostatecznie na osiągnięcie oczekiwanego efektu – uzyskania naturalistycznego modelu basenu sedymentacyjnego, turbulentnego prądu zawieszinowego i realistycznego modelu stożka głębokomorskiego (rys. 13). Jest to bardzo czasochłonne, pracochłonne i materiałochłonne.
- Efekt końcowy wymaga atrakcyjnej oprawy wizualnej.
- Poziom atrakcyjności można zwiększać przez dodanie ścieżki dźwiękowej, treści czytanych przez lektora, różnych wersji językowych itp.
- Zakres geointerpretacji prezentowanych procesów powinien być dostosowany do odbiorcy zdefiniowanego na początku prac.
- Jeśli pozwalają na to warunki, prezentowany poziom i zakres merytoryczny geointerpretacji powinien być sprawnie modyfikowany, w zależności od tego, kim jest aktualnie zainteresowany narzędziem odbiorca – inny poziom treści powinien być przeznaczony dla dzieci, a inny dla pasjonatów.
- Gotowy produkt może wzbudzić zainteresowanie jednostek muzealnych i być ekspozycyjny na wystawach związanych z budową Ziemi.



Rys. 13. Model stożka głębokomorskiego – ujęcie z trzech kamer

Podziękowania

Autor dziękuje recenzentom, Pani Ewie Welc i Panu Piotrowi Strzebońskiemu, za cenne uwagi i sugestie oraz za merytoryczne wsparcie w zakresie zagadnień geoturystycznych i sedimentologicznych. Za ciekawą dyskusję, rady i pomoc w tłumaczeniu na język angielski autor dziękuje Panu Markowi Wendorffowi. Za opiekę i pomoc w pozyskaniu środków finansowych niezbędnych do powstania i uruchomienia minilaboratorium sedimentologicznego – Opiekunom Studenckiego Koła Naukowego Kartografii Geologicznej i Komputerowej „Azymut” – Panom Jerzemu Zasadniemu, Andrzejowi Świąderowi i Piotrowi Strzeleckiemu. Za osobiste wsparcie idei i rozwoju projektu Panom Wojciechowi Mastejowi, Tomaszowi Bartusiowi, Piotrowi Siwkowi, Stanisławowi Godyniowi, Konstantemu Kulikowi oraz Paniom Monice Pilarz i Renacie Stadnik. Za nieocenione pomysły i pomoc merytoryczną w trakcie realizacji prac laboratoryjnych – Piotrowi Strzebońskiemu, a za wsparcie logistyczne Kolegom z Koła – Radosławowi Szczęchowi, Jakubowi Andrzejakowi, Mikołajowi Pawlakowi, Janowi Szydłowskiemu, a także Marcelowi Mrocze, Karolowi Herokowi, Adamowi Garbarczykowi, Michałowi Majewskiemu, Nicolasowi Sołkowi i Dominikowi Polakowi. Pracę zrealizowano przy wsparciu i pod opieką naukową Pani Ewy Welc i Pana Piotra Strzebońskiego w ramach działalności kół naukowych WGGiOŚ Akademii Górniczo-Hutniczej w Krakowie – Koła Naukowego „Geoturystyka” oraz Studenckiego Koła Naukowego Kartografii Geologicznej i Komputerowej „Azymut”.

LITERATURA

- [1] Pasierbiewicz K.W., *Laboratorium do modelowych badań sedimentologicznych*, Zeszyty Naukowe Akademii Górniczo-Hutniczej im. Stanisława Staszica, nr 488, Geologia, t. 1, z. 1, 1975, s. 49–60.
- [2] Bukowski K., Mastej W., Kępiński J., *Badania laboratoryjne nad sedimentacją osadów mułowo-solnych w zależności od warunków przepływu i charakteru materiału sedimentacyjnego*, Technika Poszukiwań Geologicznych. Geosynoptyka i Geotermia, r. 44, z. 234–235, nr 4–5, 2005, s. 69–76.

- [3] Pasierbiewicz K.W., Kotlarczyk J., *Flume experiments with fine-grained suspension, with applications for the origin of mud laminites*, Journal of Sedimentary Research, vol. 67, no. 3, 1997, s. 510–513, <https://doi.org/10.1306/D42685B3-2B26-11D7-8648000102C1865D>.
- [4] Słomka T., Kicińska-Świdorska A., *Geoturystyka – podstawowe pojęcia*, Geoturystyka, vol. 1(1), 2004, s. 5–7.
- [5] Welc E.M., Miśkiewicz K., *Geoturystyka i geoedukacja w rezerwacie przyrody nieożywionej „Prądky” im. prof. Henryka Świdzińskiego*, Geotourism/Geoturystyka, vol. 1–2(56–57), 2019, s. 11–42, <https://doi.org/10.7494/geotour.2019.56-57.2>.
- [6] Migoń P., *Geoturystyka*, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 2012.
- [7] Strzeboński P., *Residual rocky forms in the landscape of the Outer Carpathians (Silesian Beskid Mts, Poland) – geotourist and sedimentological case study*, Geotourism/Geoturystyka, vol. 18(1–2) (64–65), 2021, s. 3–22, [https://doi.org/10.7494/geotour.2021.1-2\(64-65\).3](https://doi.org/10.7494/geotour.2021.1-2(64-65).3).
- [8] Ziarek Z., *Kamienie Brodzińskiego jako atrakcja geoturystyczna gminy Lipnica Murowana*, [w:] Bogacz P. (red.), *Artykuły Laureatów 63. Barbórkowej Konferencji Studenckich Kół Naukowych AGH*, Wydawnictwa AGH, Kraków 2023, s. 239–248, <https://repo.agh.edu.pl/entities/publication/d81969de-bca9-48ef-a3c4-388dcdfdbc806>.
- [9] Ziarek Z., *Projektowanie narzędzia geoedukacyjnego dla potrzeb geoturystyki – studium przypadku sedymentologicznego modelowania prądu zawiesinowego*, [w:] 64. Barbórkowa Konferencja Studenckich Kół Naukowych Pionu Górniczego AGH, 7 grudnia 2023 Kraków 2023, s. 76–77 [materiały konferencyjne], https://www.researchgate.net/publication/376312074_Designing_a_geoeducational_tool_for_geotourism_needs_-_a_case_study_of_sedimentological_modeling_of_turbidity_current_-_Projektowanie_narzedzia_geoedukacyjnego_dla_potrzeb_geoturystyki_-_studium_przyp.
- [10] Unrug R. (red.), *Przewodnik po zachodnich Karpatach fliszowych*, Wydawnictwa Geologiczne, Warszawa 1969.
- [11] Gradziński R., Kostecka A., Radomski A., Unrug R., *Zarys sedymentologii*, Wydawnictwa Geologiczne, Warszawa 1986.
- [12] Słomka T., *Głębokomorska sedymentacja silikoklastyczna warstw godulskich Karpat*, Prace Geologiczne – Polska Akademia Nauk. Oddział w Krakowie, 139, Wydawnictwo Polskiej Akademii Nauk, Kraków 1995.
- [13] Ślaczka A., Kaminski M.A., *A Guidebook to Excursions in the Polish Flysch Carpathians. Field Trips for Geoscientists*, Grzybowski Foundation Special Publication, no. 6, The Grzybowski Foundation, Kraków 1998.
- [14] Strzeboński P., *Contrasting styles of siliciclastic flysch sedimentation in the Upper Cretaceous of the Silesian Unit, Outer Western Carpathians: sedimentology and genetic implications*, Annales Societatis Geologorum Poloniae, vol. 92, no. 2, 2022, s. 159–180, <https://doi.org/10.14241/asgp.2022.04>.
- [15] Siwek P., Waśkowska A., Wendorff M., *Mud-rich low-density turbidites in structurally-controlled intraslope mini-basin: The influence of flow containment on depositional processes and sedimentation patterns (Szczawa, Oligocene, Polish Outer Carpathians)*, Sedimentology, vol. 70, iss. 6, 2023, s. 1741–1784, <https://www.doi.org/10.1111/sed.13095>.

- [16] Shanmugam G., *Mass Transport, Gravity Flows, and Bottom Currents: Downslope and Alongslope Processes and Deposits*, Elsevier, 2021.
- [17] Talling P.J., Masson D.G., Sumner E.J., Malgesini G., *Subaqueous sediment density flows: Depositional processes and deposit types*, *Sedimentology*, vol. 59, iss. 7, 2012, s. 1937–2003, <https://doi.org/10.1111/j.1365-3091.2012.01353.x>.
- [18] Alexandrowicz Z., *Skalki piaskowcowe Zachodnich Karpat fliszowych*, *Prace Geologiczne – Polska Akademia Nauk. Oddział w Krakowie. Komisja Nauk Geologicznych*, 113, Zakład Narodowy im. Ossolińskich – Wydawnictwo PAN, Wrocław 1978, s. 1–86.
- [19] Alexandrowicz W.P., Alexandrowicz Z., *Geosites in tourist areas: the best method for the promotion of geotourism and geoheritage (an example from the Polish Flysch Carpathians)*, *Geoheritage*, 14, iss. 2, 2022, 45, <https://doi.org/10.1007/s12371-022-00655-2>.
- [20] Reading H.G., Richards M., *Turbidite systems in deep-water basin margins classified by grain size and feeder system*, *AAPG Bulletin*, vol. 78(5), 1994, s. 792–822, <https://doi.org/10.1306/A25FE3BF-171B-11D7-8645000102C1865D>.

SUMMARY

Geoeducational tools are common used to popularize knowledge in the field of Earth Sciences, including geological knowledge, and the promotion of geotourism. They facilitate the recognition of geodiversity in the landscape and in individual geosites, sensitizing the audience to cognitive and aesthetic values. This approach translates into caring for the preservation of natural heritage for future generations and emphasizes the need for its protection. The effectiveness of a geoeducational tool is based on reliable knowledge of geological processes and their products, as well as skilful geointerpretative phase. In the geointerpretation process, it is important to maintain factual correctness and to indicate and explain the most significant elements/stages (e.g., of a particular process) while simultaneously maintaining a level of knowledge transfer that is understandable. The main user of geoeducation and its tools is a geotourist and a tourist interested in the origins of the surrounding inanimate natural objects, but lacking specialized education helpful in understanding them.

The aim of the presented geoeducational tool is to provide a simplified illustration of the key stages of formation of one of the types of flysch deposits (turbidite) that predominate in the Outer Carpathians – the process of transport and sedimentation of clastic material involving turbidity currents.

The inspiration for conducting sedimentological modelling for the development of a geoeducational tool came from the geological field observations of the author, visit to the sedimentological laboratory of Department of General Geology and Geotourism at the Faculty of Geology, Geophysics and Environmental Protection of AGH University of Krakow, and previous experiments conducted in this laboratory (Fig. 1) [1–3]. The design of the geoeducational tool was based on the idea of geoeducation through the dissemination of geological knowledge [4–9]. The aim of the project was to create a geoeducational tool – an instructional video

explaining to the audience the nature of sedimentary processes responsible for the formation of the Carpathian flysch turbidites [9–17].

The presented idea of geoeducation was realized by designing our own student sedimentological mini laboratory (Fig. 2). Therefore, the successive stages of designing the geoeducational tool included: (a) determining the subject, aim, methods, and audience, (b) gathering, organizing, and possibly supplementing knowledge, which formed the substantive basis for the project of the geoeducational tool, (c) selection of issues and elements to be presented using the tool, (d) substantive design, (e) technical design, (f) testing of the tool and introducing corrections and improvements, and (g) compiling a film with explanations.

Experiments on the formation of sediments broadly corresponding to turbidites [14, 16–17] – one of the types of flysch deposits that form the Outer Carpathians (Fig. 3) [9, 11–14] – were the subject of analog sedimentological modeling. Flysch can be considered in a broad sense [10–19] as:

- genetically: a set of deep-water sediments formed from terrigenous material, created mainly by sediment gravity flows;
- lithologically: sedimentary series consisting of alternating sandstone and shale beds which can be associated with coarser-grained strata (conglomerates);
- geotectonically: thick series of sedimentary rocks formed in the pre- or early orogenic stage of development of sedimentary basins.

Deep-water turbidity current is one of the mechanisms of gravity-driven transportation-depositional processes of clastic material (Fig. 4). Low-concentration suspension (a mixture of sediment and water with a volumetric concentration up to 23%) moves as turbulent flow powered by gravity along the slope (Fig. 8) and the bottom of the sedimentary basin (Fig. 5) gradually losing velocity, energy and sediment. The product (bed) of turbidity current (understood in this way) is a turbidite with normal grain-size gradation (Fig. 6), often with flute casts present on the soles (undersides) of beds [10, 14]. Turbidite formations were deposited mainly in the distal sedimentary zone (at the base of the slope and on the basin plain), often in the form of depositional lobes, together forming a deep-sea fan system with central channel passing into branching-off distributary channels [11, 14, 20].

The methodics of the research was based on the assumptions of process sedimentology [7, 8, 14, 16], whose idea of proceeding „from detail to general” includes necessary conditions in the form of: (a) detailed factographic analysis (litho-sedimentological characteristics) of the products, based on which its belonging to a particular category (lithofacies) is defined, (b) the physical sedimentary process interpretation, i.e., matching transport-deposition mechanisms, and (c) creating a general erosional-depositional system model that cannot contradict the facts collected at the beginning and is consistent with the observed rock record and its interpretation (descriptive textural-structural characteristics). Such a model is intended to visualize geological processes in a simple and clear manner and to show their products. However, during modelling, the correspondence with reality must be maintained to such an extent of approximation as to obtain the most naturalistic image of the environment and the conditions under which the analysed process and its product could occur.

In the sedimentological mini laboratory, a film was planned to be shot presenting the environmental model of the inflow submarine fan depositional system, turbulent suspension flow, and deposition of normally graded turbidites. For this purpose, the following components of the geoeducational tool were developed: (a) an aquarium filled with water as the sedimentary basin tank (Fig. 7), (b) a plexiglass-based “continental” slope (Fig. 9), (c) sand as an alternative bottom fill (Fig. 11), and (d) a plastic tube with a funnel as a point supplying source.

During the digital processing of the film material, elements of „theatricality” were added in the form of: assembling the image from 3 shots into a coherent chronological visualization, adding a realistic landscape, and isolating a screen fragment for the introduction of geointerpretational content (Fig. 12).

Working on constructing the geoeducational tool allowed to specify its most important features, which are: clarity of the experiment, readability, naturalism, realism, spectacularity, theatricality, and repeatability. Thanks to these attributes, the recipient is able to learn and understand issues related to: the natural sedimentary basin, its configuration and components, point feeding of the subaqueous reservoir with clastic material, turbidity current as one of the examples of sediment gravity flows, and the model of deep-sea fan as the channelized erosional-depositional body characteristic for flysch sedimentary successions.

The conducted physical sedimentological modelling of turbidity currents (Fig. 10) aimed to search for process analogies for the genesis of the Carpathian flysch turbidites and the creation of a geoeducational tool (Fig. 13). It allowed drawing the following conclusions: (a) creating a geoeducational tool requires the author to prepare at a much higher level of expertise than later presented and explained to the audience, (b) refining the tool requires many repetitions based on trial and error to achieve the expected effect – this is very time, labour, and material-consuming, (c) the final effect requires attractive visual presentation, (d) the level of attractiveness can be increased by adding a narrator, various language versions, etc., (e) the level of geointerpretation of the presented processes should be adapted to the audience defined at the beginning, (f) if conditions allow, the presented level and scope of geointerpretation should be smoothly modified depending on the type of audience, and (g) the finished product may arouse the interest of museum units and be applied to museum exhibitions.



ISBN 978-83-67427-86-9
ISSN 3071-7019