

ARTYKUŁY LAUREATÓW

65.



BARBÓRKOWEJ KONFERENCJI

Studenckich Kół Naukowych AGH



WYDAWNICTWA AGH

KRAKÓW 2025

ARTYKUŁY LAUREATÓW

65.

BARBÓRKOWEJ
KONFERENCJI
STUDENCKICH
KÓŁ NAUKOWYCH
AGH



STUDENCKIE KOŁA NAUKOWE AGH



WYDAWNICTWA AGH
KRAKÓW 2025

Wydawnictwa Akademii Górniczo-Hutniczej im. Stanisława Staszica w Krakowie

© Wydawnictwa AGH, Kraków 2025

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

ISBN 978-83-68219-43-2

ISSN 3071-7019

<https://doi.org/10.7494/978-83-68219-43-2>

Redaktor naukowy tomu:

Paweł Bogacz (AGH Akademia Górniczo-Hutnicza)

Książka prezentuje artykuły naukowe, które powstały na podstawie referatów laureatów 65. Barbórkowej Konferencji Studenckich Kół Naukowych AGH z 12–13 grudnia 2024 roku. Wszystkie uzyskały dwie pozytywne recenzje.

Projekt okładki i strony tytułowej: *Paweł Sepielak*

W projekcie wykorzystano elementy graficzne opracowane przez *Aleksandrę Rosek*

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

Karol Adamczyk METODA <i>SIGNATURE HOLE</i> JAKO NARZĘDZIE DOBORU OPÓŹNIEŃ MILISEKUNDOWYCH W PROJEKTOWANIU ROBÓT STRZAŁOWYCH W KOPALNIACH ODKRYWKOWYCH	7
Alicja Bednarek, Maksymilian Zarychta, Rafał Czompelik BADANIE WPŁYWU WARUNKÓW ŚRODOWISKOWYCH NA PARAMETRY PRACY WODOROWEGO OGNIWA PALIWOWEGO PEM...	21
Anna Celary, Aleksander Szewc ZAPOMNIANY FAJANS WSCHODU – WYTWÓRNIE CERAMIKI W LUBYCY KRÓLEWSKIEJ, SIEDLISKACH I POTYLICZU – HISTORIA, PRODUKCJA I WZORNICTWO	35
Patryk Darłak UWZGLĘDNIENIE PANELI FOTOWOLTAICZNYCH W PROCESIE PROJEKTOWANIA STAŁOWYCH HAŁ PRZEMYSŁOWYCH...	51
Tomasz Dąbrowa OCENA MOŻLIWOŚCI DETEKCJI UBYTKÓW LEŚNYCH Z WYKORZYSTANIEM INDEKSÓW WEGETACYJNYCH OBLICZONYCH NA PODSTAWIE DANYCH OPTYCZNYCH Z SATELITY SENTINEL-2A NA PRZYKŁADZIE BORÓW TUCHOLSKICH	67
Jakub Długosz, Grzegorz Ficak, Łukasz Lisiecki WPŁYW TEMPERATURY KUCIA NA WŁASNOŚCI MECHANICZNE WYROBÓW I ZUŻYCIE ENERGII PODCZAS ODKUWANIA KOTEW PRZEMYSŁOWYCH	79
Miłosz Domagalski BUDOWA STANOWISKA DO WYZNACZANIA PRZYROSTU TEMPERATURY POWIETRZA SPOWODOWANEGO DZIAŁANIEM URZĄDZEŃ ELEKTRYCZNYCH I OŚWIETLENIA	87
Maria Franczyk BIODRUK 3D: REWOLUCJA W MEDYCYNIE – MOŻLIWOŚCI, WYZWANIA I PRZYSZŁOŚĆ ZASTOSOWAŃ.....	105

Anna Golak COMPARISON OF EUROPEAN UNION COUNTRIES IN TERMS OF EDUCATIONAL AND TECHNOLOGICAL COMPETENCIES OF THEIR SOCIETIES	115
Przemysław Guziak ROZWÓJ POJAZDU ZEPHYR AGH Z WYSZCZEGÓLNIENIEM DOBORU JEDNOSTEK NAPĘDOWYCH	133
Małgorzata Hasal METODYKA SYNTEZY I DRUKU 3D ORAZ PRZYGOTOWANIA MONOLITÓW WĘGLOWYCH DO ZASTOSOWAŃ W OGRANICZENIU EMISJI CO ₂ PRZEZ SEKTOR ENERGETYKI.	145
Jadwiga Hyla ANALIZA MOŻLIWOŚCI BUDOWY SOCZEWKI AKUSTYCZNEJ Z WYKORZYSTANIEM METAMATERIAŁÓW AKUSTYCZNYCH.....	167
Kosma Knap, Jakub Długosz, Konrad Perzyński, Łukasz Lisiecki JEDNOPUNKTOWE FORMOWANIE BLACH JAKO EFEKTYWNA METODA PRODUKCJI MAŁOSERYJNEJ I PROTOTYPOWANIA	179
Michał Korzeniowski, Szczepan Kulik MODERN PROMOTION STRATEGIES IN SOCIAL MEDIA	189
Justyna Kowalik MODELOWANIE PROCESU PNEUMATYCZNEGO FORMOWANIA CIENKICH POWŁOK STAŁOWYCH TECHNOLOGIĄ FIDU	197
Aleksandra Kugler ZARZĄDZANIE ŚLADEM WĘGLOWYM W MOTORSPORCIE	211
Aleksandra Lis, Karolina Wolska, Anna Przewięźlikowska REALIZACJA OSNOWY GEODEZYJNEJ POZIOMEJ NA POTRZEBY OBSŁUGI ZAMKU KRÓLEWSKIEGO NA WAWELU	223
Franciszek Michalski <i>LEGO: PRZYGODA</i> – KREATYWNY PLAGIAT CZY DEKONSTRUKCJA MESJANIZMU	239
Kajetan Nowak KONIEC WALKI Z WIATRAKAMI? ANALIZA WPLYWU PROPONOWANEJ NOWELIZACJI PRAWA NA POWIERZCHNIĘ DOSTĘPNĄ DLA TURBIN WIATROWYCH.....	249
Julia Papée DESIGNING FOR INCLUSION: NAVIGATING THE OPPORTUNITIES AND CHALLENGES OF CROSS-CULTURAL UX	259

Klaudia Piątek SŁUCHOWISKA BINAURALNE W ROZWIJANIU ORIENTACJI PRZESTRZENNEJ	273
Ignacy Rapa, Wiktoria Kuchta, Jakub Miszczyński PROTOTYP JEDNOŁAŃCUCHOWEGO PRZENOŚNIKA KUBEŁKOWEGO O ZMIENNEJ GEOMETRII TRASY PRZEZNACZONEGO DO TRANSPORTU REGOLITU KSIĘŻYCOWEGO	287
Karolina Rożek AI IN HIGHER EDUCATION: ACADEMIC SUPPORT OR ETHICAL DILEMMA? ANALYZING STUDENT USE OF GPT MODELS DURING EXAMS	307
Igor Szajer ROZWÓJ OSOBISTY Z PERSPEKTYWY STUDENTA	323
Dorota Ślusarz, Łukasz Wiwatowski KONSTRUKCJA I PRZEZNACZENIE AUTONOMICZNEGO WÓZKA TRANSPORTOWEGO SPINCART	335
Jan Udaliszczew BADANIE PROCESU RAFINACJI PARAFINY Z WYKORZYSTANIEM ZIEM FILTRACYJNYCH: WPŁYW SKŁADNIKÓW CHEMICZNYCH NA JAKOŚĆ PRODUKTU KOŃCOWEGO	351
Agata Zapałowska LUSTERECZKO, LUSTERECZKO, POWIEDZ PRZECIE, CZYM JEST OBCOŚĆ W ŚWIECIE – LUB PRZYNAJMNIEJ KIM JEST OBCY WE MNIE? INTERPRETACJA <i>ARCANE</i> I <i>DROGI</i> PRZEZ PRYZMAT PSYCHOANALIZY ORAZ STUDIÓW NAD OBCOŚCIĄ INTRAPERSONALNĄ.....	363
Zbigniew Jan Ziarek, Piotr Strzeboński, Ewa Welc GEOEDUCATIONAL TOOL FOR GEOTOURISM NEEDS – A FILM ILLUSTRATING THE ORIGIN OF SANDSTONE-CONGLOMERATIC DEPOSITS OF THE CARPATHIAN ROCKY FORMS	375

Karol Adamczyk*

METODA *SIGNATURE HOLE* JAKO NARZĘDZIE DOBORU OPÓŹNIEŃ MILISEKUNDOWYCH W PROJEKTOWANIU ROBÓT STRZAŁOWYCH W KOPALNIACH ODKRYWKOWYCH

Urabianie materiałami wybuchowymi (MW) stanowi podstawową metodę eksploatacji surowców w odkrywkowych zakładach górniczych. Sposób ten charakteryzuje się pozyskiwaniem dużej ilości dobrze rozdrobnionego urobku. Jednak detonacja ładunków MW jest źródłem wielu zagrożeń, które negatywnie wpływają na otoczenie kopalni. Podczas detonacji ładunków MW w otworach strzałowych, oprócz wykorzystania energii wybuchu do urobienia kopaliny, część energii ulega rozproszeniu, co powoduje określone zagrożenia, m.in. oddziaływanie drgań parasejsmicznych na zabudowania w otoczeniu kopalń odkrywkowych. Przeprowadzone badania skupiły się na minimalizacji wpływu prac strzałowych na otoczenie odkrywkowego zakładu górniczego dzięki doborowi optymalnego opóźnienia pomiędzy kolejno detonowanymi ładunkami MW w siatce otworów strzałowych. Badania obejmują analizę oddziaływania robót strzałowych na środowisko z wykorzystaniem systemu KSMD, metody *signature hole* (SH) oraz oprogramowania wspomagania robót strzałowych SeisDel.

THE SIGNATURE HOLE METHOD AS BASIS FOR MILLISECOND DELAYS SELECTION IN THE DESIGN OF BLASTING OPERATIONS IN OPEN-PIT MINES

Blasting with explosives is the fundamental method of resource exploitation in open-pit mining operations. This method involves extracting a large quantity of well-fragmented material. During the detonation of explosive charges in blast holes, in addition to using the explosion energy to extract the mineral, part of the energy is dispersed, causing certain threats, including: the impact of paraseismic vibrations on buildings in the vicinity of open-pit mines. The scientific research focuses on minimizing the impact of blasting on the surroundings of open-pit mine. The main objective is to select the optimal delay between sequentially detonated explosive charges in the designed blast hole pattern. The research includes an analysis of the impact of blasting operations on the environment using the KSMD system. A crucial aspect involves selecting the millisecond delay using the signature hole method (SH) and the SeisDel blast operations support software. This is aimed at minimizing the adverse effects of blasting operations on buildings in the vicinity of the mine.

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

1. WPROWADZENIE

Eksploatacja surowców skalnych – zarówno w Polsce, jak i za granicą – związana jest głównie ze stosowaniem materiałów wybuchowych (MW) w procesie urabiania złożeń. Efektywność urabiania oceniana jest na podstawie stopnia rozdrobnienia oraz ilości odstrzelonego urobku, co wiąże się ze stosowaniem większych mas ładunku MW w pojedynczej serii otworów strzałowych. W przypadku robót strzałowych realizowanych przez firmę zewnętrzną rozliczenie wykonywanych prac również opiera się na tych kryteriach [1].

Detonacji ładunków MW w odkrywkowych zakładach górniczych towarzyszą negatywne oddziaływania na otoczenie, w tym indukowanie drgań, które mogą powodować szkodliwe wpływać na obiekty budowlane w otoczeniu miejsca wykonywania robót strzałowych. Powszechnie stosowaną metodą strzelań eksploatacyjnych jest odpalanie ładunków MW w długich otworach strzałowych. Wiąże się to ze stosowaniem dużych mas MW (nawet do kilkunastu ton MW w pojedynczej serii), co przekłada się na zwiększenie efektu sejsmicznego wywołanego detonacją MW. W związku z tym zakłady górnicze prowadzą działania mające na celu wyznaczenie warunków bezpiecznego wykonywania robót strzałowych zarówno w celu zapewnienia bezpieczeństwa otoczeniu, jak i dokumentowania poziomu oddziaływania wynikającego z prowadzonych robót strzałowych [1].

Ustawy [2, 3] zobowiązują przedsiębiorcę do ochrony otoczenia kopalni przed skutkami negatywnych oddziaływań, także związanych z robotami strzałowymi. Detonacji ładunków MW zawsze towarzyszyć będzie indukowanie drgań, lecz nie wszystkie z nich są szkodliwe dla obiektów budowlanych lub są odczuwalne dla ludzi. Warunkiem tego jest stosowanie odpowiedniej profilaktyki [4].

Ważnym czynnikiem wpływającym na wielkość negatywnego oddziaływania jest jakość wykonywanych robót wiertniczo-strzałowych. Ich błędne zaprojektowanie oraz brak kontroli nad wykonywanymi robotami strzałowymi, w tym zawyżanie parametrów siatki strzałowej, złe dobrane opóźnienia pomiędzy kolejno detonowanymi ładunkami MW i przeładowanie otworów strzałowych – to częste przyczyny podwyższonej intensywności indukowanych drgań [5].

Stały rozwój technologii wykonywania robót strzałowych oraz nowoczesne środki strzałowe i sprzęt strzałowy umożliwiają m.in. efektywniejsze wykorzystanie energii materiału wybuchowego, a także minimalizację negatywnego oddziaływania na środowisko. Inicjacja ładunków MW odbywa się głównie za pomocą zapalników systemu nieelektrycznego i elektronicznego, co pozwala na szeroki zakres doboru opóźnień milisekundowych zapalników i precyzję ich zadawania [5].

Najszerzym zakresem opóźnień i największą precyzją ich zadawania charakteryzują się systemy elektronicznego inicjowania. Przykładem takiego systemu jest system elektronicznej inicjacji Unitronic 600. Zastosowanie tego typu systemów daje możliwość doboru opóźnienia o bardzo dużej precyzji, co przy odpowiednim zaprojektowaniu robót strzałowych umożliwia poprawę efektywności działania ładunku MW pod względem granulacji odstrzelonego urobku oraz zmniejszenia efektu sejsmicznego wywołanego detonacją. Ogranicza to negatywne oddziaływanie robót strzałowych na otoczenie [6]. W polskim górnictwie odkrywkowym w celu monitoringu oddziaływania drgań na otoczenie kopalni stosuje się m.in. Kopalniany System Monitoringu Drgań (KSMD). Przeznaczeniem KSMD jest pomiar prędkości

drgań gruntu i budynków, indukowanych robotami strzałowymi wykonywanymi w kopalniach odkrywkowych. W jego skład wchodzi: Kopalniana Stacja Pomiaru Drgań (KSPD), serwer gromadzący dane oraz serwis internetowy [7].

System KSMD pozwala na automatyczne gromadzenie danych pomiarowych i przesyłanie danych pomierzonych przez stacje KSPD do serwera centralnego. Dane pomiarowe opisują lokalizację stacji oraz datę i godzinę wykonania pomiaru. Gromadzone są one w centralnej bazie danych na serwerze [7]. Na podstawie danych pomiarowych system wykonuje wstępną analizę oddziaływania drgań, prowadząc podstawowe obliczenia. Wyniki tych działań są podstawą do wygenerowania raportu wraz z oceną oddziaływania, sporządzonego zgodnie z wytycznymi polskiej normy PN-B-02170:2016-12 [8].

Do przeprowadzenia oceny wpływu drgań niezbędne jest zarejestrowanie pełnych przebiegów składowych poziomych drgań (x, y). Wymagane jest także przeprowadzenie analizy tercjowej sejsmogramów, która polega na filtrowaniu sygnału przy zastosowaniu m.in. filtrów tercjowych. Filtrowanie z zastosowaniem filtra tercjowego skutkuje otrzymaniem histogramów wartości maksymalnej prędkości lub przyspieszenia w danym paśmie częstotliwości. Pozwala to na zakwalifikowanie drgań do jednej ze stref szkodliwości ich oddziaływania [8].

2. OGÓLNA CHARAKTERYSTYKA METODY *SIGNATURE HOLE*

Metoda *signature hole* pomaga w doboru optymalnego opóźnienia czasowego w odpalaniu ładunków MW w górnictwie odkrywkowym. Celem jej stosowania jest poprawa efektywności robót strzałowych dzięki maksymalnemu wykorzystaniu energii detonacji MW, co pozwala na skuteczniejsze rozdrobnienie skały i minimalizację niepożądanego oddziaływania na otoczenie, m.in. drgań parasejsmicznych. Metoda opiera się na założeniu, że w wyniku detonacji poszczególnych ładunków MW generowane są praktycznie identyczne drgania, co wskazywałoby na zastosowanie takiego samego rodzaju i masy każdego ładunku, detonację wszystkich ładunków w jednakowej lokalizacji oraz identyczną interakcję każdego ładunku MW z górotworem. Jest to uproszczenie, ponieważ w rzeczywistości takie warunki nie istnieją [5, 9, 10].

Metodyka doboru opóźnienia opiera się na analizie zarejestrowanych sygnałów drgań wzbudzonych pojedynczymi ładunkami MW. Na podstawie sygnału generowanego przez pojedynczy ładunek, przy zastosowaniu zadanych opóźnień oraz zasady liniowej superpozycji, sumuje się sygnały w celu prognozy całkowitego przebiegu drgań, które zostaną wzbudzone podczas odpalenia serii ładunków w otworach strzałowych. Proces powtarzany jest przy zastosowaniu różnych opóźnień milisekundowych w celu znalezienia optymalnego opóźnienia, które pozwoli na minimalizację szczytowej wartości prędkości drgań (PPV) [5, 9, 10].

Efektem zastosowania metody jest prognoza drgań wzbudzonych detonacją ładunków MW. W celu doboru odpowiedniego opóźnienia niezbędne jest wykonanie kilku symulacji oraz porównanie wartości prognozowanych. W metodzie *signature hole* kluczową wartością prognozowaną jest maksymalna prędkość drgań. Jednak do przeprowadzenia oceny oddziaływania na otoczenie zgodnie z polską normą [8] konieczne jest wykonanie dodatkowej analizy z zastosowaniem filtrowania tercjowego.

Końcowym i jednocześnie kluczowym etapem działań związanych z doбором opóźnienia jest weryfikacja oparta na pomiarze rzeczywistych drgań wzbudzonych detonacją ładunków

w serii wielootworowej, zaprojektowanej z wykorzystaniem metody *signature hole*, oraz ewentualna korekta i kalibracja poszczególnych wartości opóźnień podczas wykonywania kolejnej analizy. Ostateczne dostosowanie opóźnień zależy także od specyficznych warunków geologiczno-górnich danego obszaru, które mogły nie zostać uwzględnione w procesie wcześniejszego prognozowania intensywności wzbudzanych drgań.

3. PROCEDURA DOBORU OPÓŹNIENIA MILLISEKUNDOWEGO METODĄ *SIGNATURE HOLE*

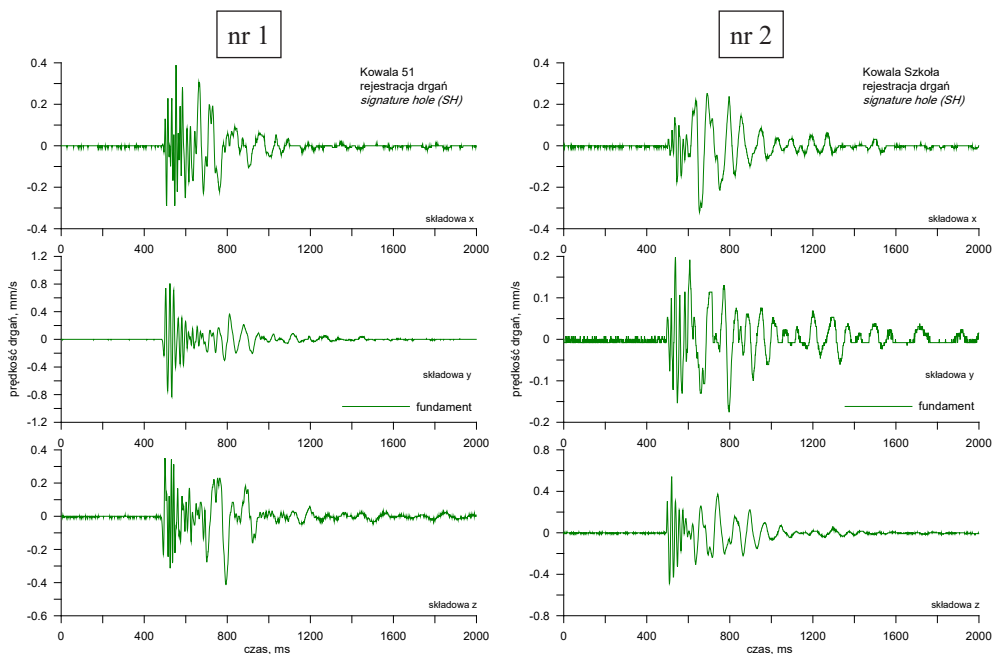
Ocenę oddziaływania drgań wykonano z użyciem skal SWD w wersji prędkościowej, zgodnie z polską normą PN-B-02170:2016-12 [8], na podstawie danych z pomiarów drgań wykonanych przez mierniki umieszczone bezpośrednio na fundamentach budynków.

Analiza związana z doбором opóźnień milisekundowych projektowanej serii otworów strzałowych przeprowadzona została na przykładzie odkrywkowego zakładu górniczego eksploatującego wapienie i margle dewońskie [11]. Zgodnie z opracowaną metodą doboru opóźnienia otwór wzorcowy zawierał pojedynczy ładunek MW o masie równej $Q_z = 21,5$ kg. Ładunek MW został umieszczony na dnie otworu. Parametry otworu strzałowego przedstawiono w tabeli 1.

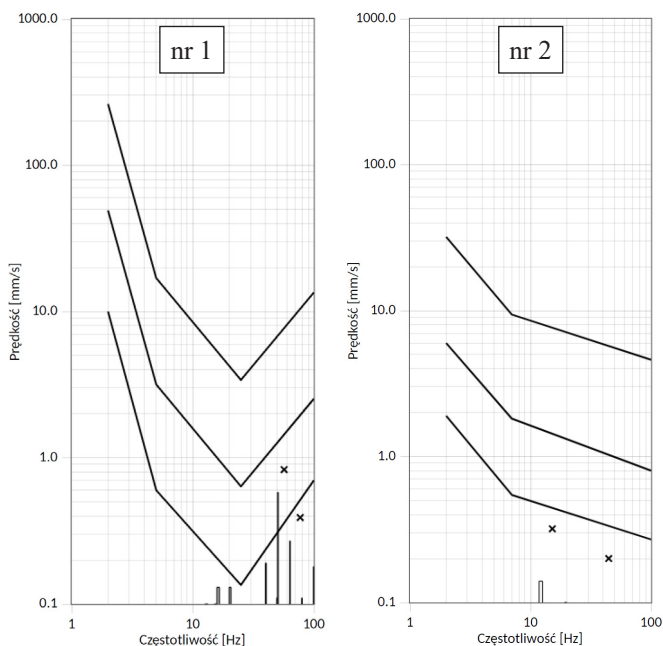
Tabela 1. Zestawienie parametrów otworu strzałowego

Parametr	Wartości dozwolone	Wartości projektowane
Średnica otworu d [mm]	95–105	102
Wysokość ściany H [m]	4,2–24,0	9,9
Długość otworu l_o [m]	>6,0	11,5
Długość przybitki l_p [m]	>3,0	9,4
Długość przewiertu l_{pw} [m]	≤1,5	1,0
Długość przybitki wewnątrzotworowej l_{ps} [m]	0,5–1,5	–
Kąt nachylenia otworu α [°]	70–85	70
Zabór z [m]	3,0–4,5	3,5
Odległość między otworami a [m]	3,0–4,5	–
Odległość między szeregami b [m]	2,5–4,0	–
Całkowita masa ładunku MW Q_c [kg]	1000,0	21,5
Masa ładunku MW przypadająca na stopień opóźnienia Q_z [kg]	22,0	21,5

Sygnał drgań wzbudzonych detonacją ładunku wzorcowego został zarejestrowany na dwóch stacjach pomiarowych KSMD. Sejsmogramy pomierzonych drgań zaprezentowano na rysunku 1. Sygnał poddany został także filtrowaniu tercjomu w celu przedstawienia go na tle skal SWD (rys. 2).



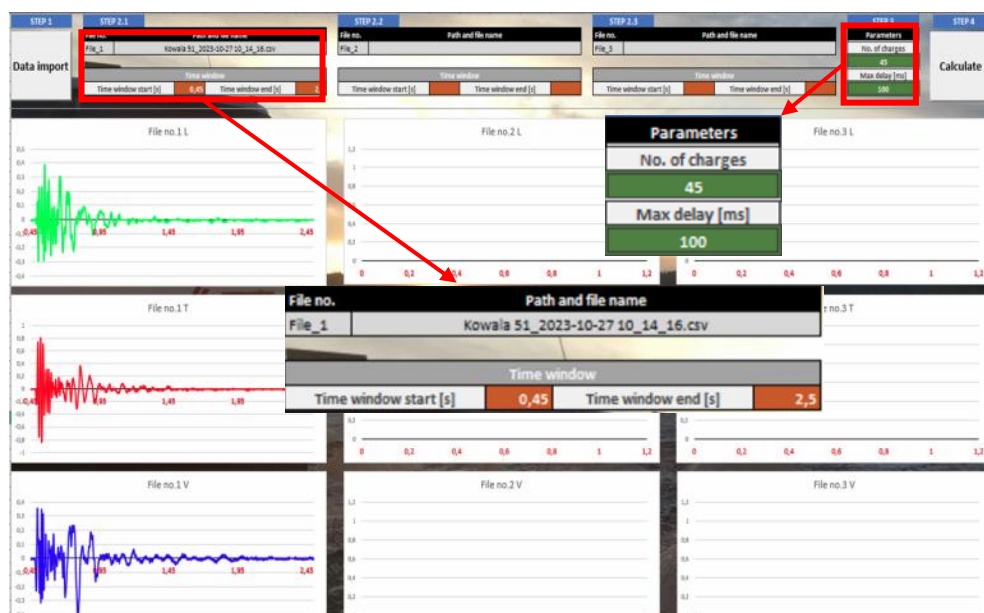
Rys. 1. Przebieg drgań wzbudzonych ładunkiem MW otworu *signature hole*



Rys. 2. Ocena intensywności drgań wzbudzonych ładunkiem MW w otworze *signature hole*

W przypadku stacji pomiarowej nr 1 możemy zaobserwować dominację drgań o wyższych częstotliwościach, których prędkość znajduje się maksymalnie w strefie II, a wartość PPV wyniosła 0,83 m/s względem osi y . Stacja pomiarowa nr 2 zarejestrowała PPV na poziomie 0,32 względem składowej x . Dominująca częstotliwość wynosi około 12,0 Hz [11].

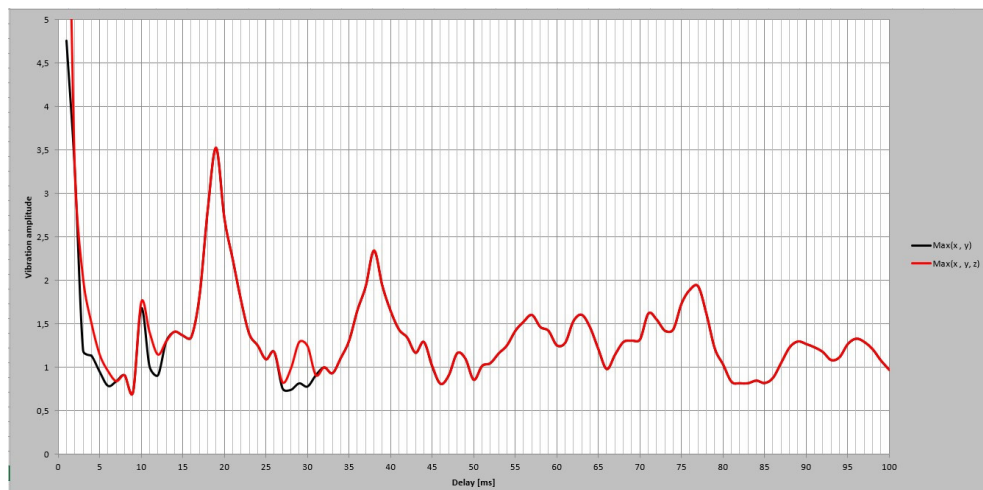
Analiza zarejestrowanego sygnału drgań wzbudzonych otworem wzorcowym (SH) rozpoczęła się od wprowadzenia do programu SeisDel zapisu sygnałów z dwóch stacji, a następnie ograniczeniu zakresu czasowego zdarzenia. Zadano także liczbę ładunków, które znajdują się w projektowanej siatce strzałowej (15 otworów, po 3 ładunki na otwór), oraz maksymalny czas opóźnienia milisekundowego, dla którego program ma przeprowadzić obliczenia (rys. 3) [11].



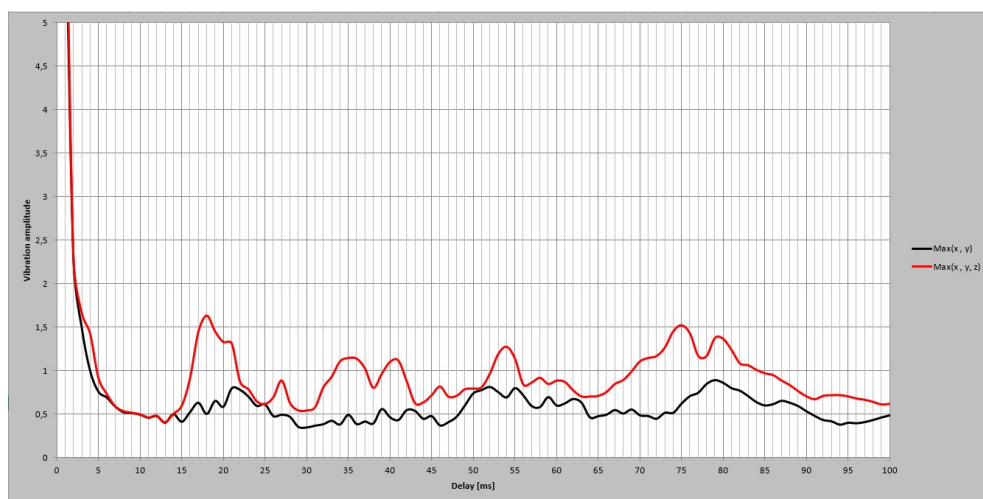
Rys. 3. Proces analizy w oprogramowaniu SeisDel sygnału zarejestrowanego na stacji monitorującej drgania

Następnym krokiem w procesie doboru opóźnień była analiza wyników przeprowadzonych obliczeń i dobór wariantów opóźnień milisekundowych między kolejno odpalaniem ładunkami, oparty na wykresie przedstawiającym zależność amplitudy drgań od zastosowanego opóźnienia milisekundowego kolejnych ładunków MW (rys. 4, 5).

Na podstawie danych z wykresów (rys. 4, 5) do dalszej analizy przyjęte zostały opóźnienia z zakresu 8–100 ms, którym odpowiadały najniższe amplitudy drgań: 9 ms, 12 ms, 13 ms, 15 ms, 30 ms i 46 ms [11].



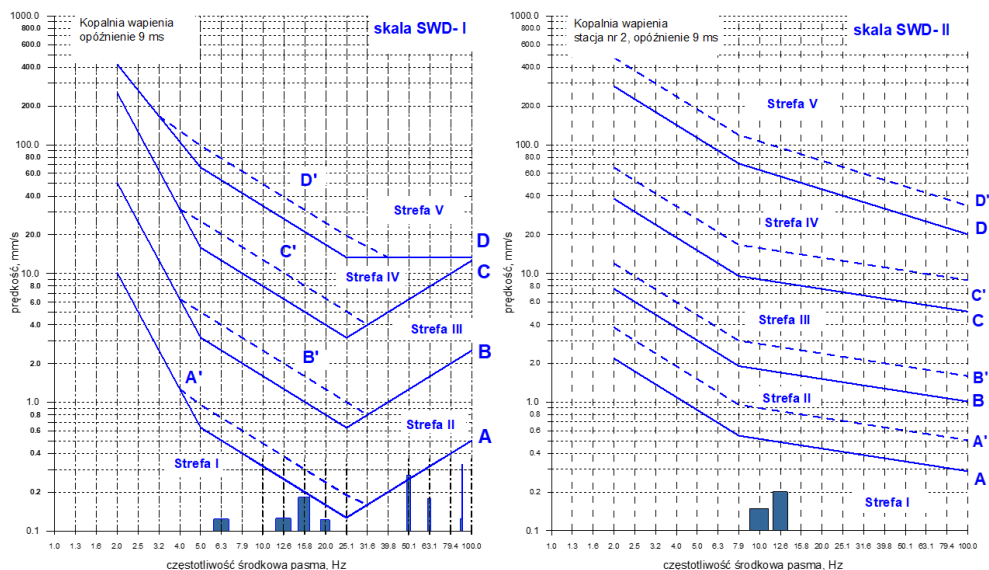
Rys. 4. Prognoza zależności amplitudy drgań od zastosowanego opóźnienia – stacja KSMD nr 1



Rys. 5. Prognoza zależności amplitudy drgań od zastosowanego opóźnienia – stacja KSMD nr 2

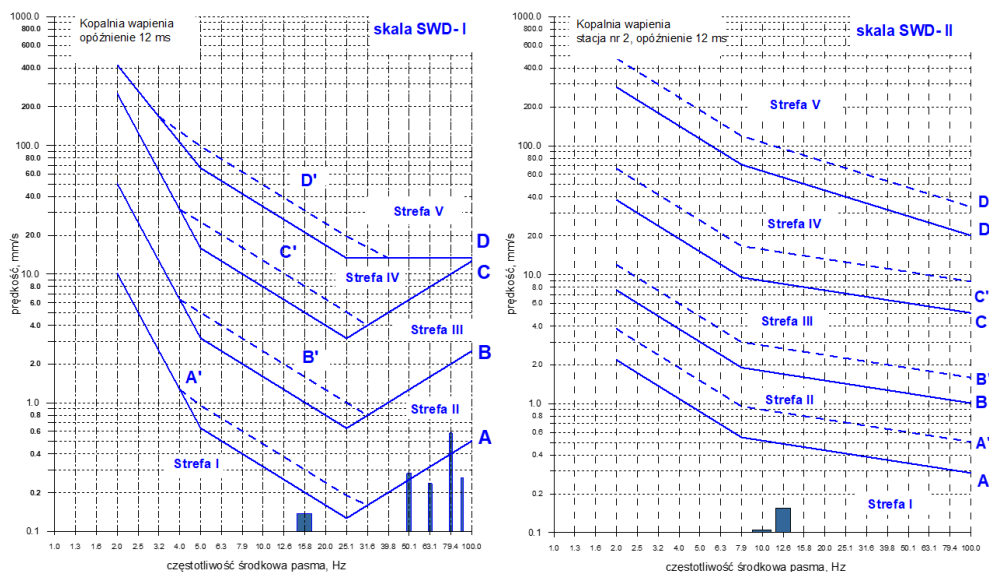
Zestawienie wyników analizy

W wariancie I (9 ms) na stacji pomiarowej nr 1 występują drgania znajdujące się maksymalnie na granicy stref I i II. Dominują częstotliwości około 50,0 Hz i 90,0 Hz. Na stanowisku nr 2 dominują drgania o częstotliwościach 10,0 Hz i 12,6 Hz, które znajdują się w I strefie oddziaływania (rys. 6).



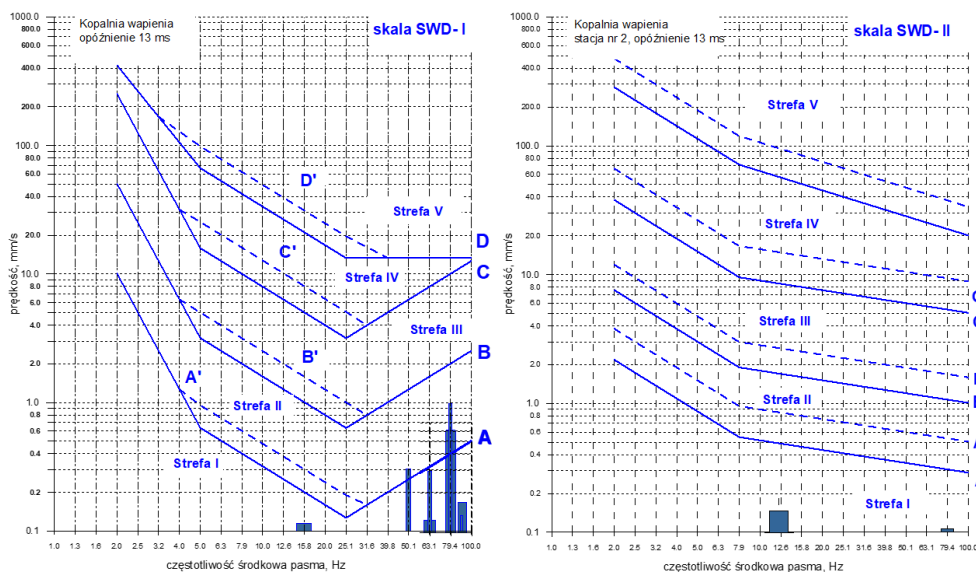
Rys. 6. Ocena oddziaływania prognozowanych drgań wzbudzonych przez serię ładunków MW z zastosowanym wariantem I (9 ms)

W wariantie II (12 ms) na stanowisku pomiarowym nr 1 dominują drgania o wyższych częstotliwościach (50,1–90,0 Hz), które maksymalnie znalazły się w strefie II. W przypadku stacji pomiarowej nr 2 prognozuje się występowanie drgań o częstotliwościach 10,0 Hz i 12,6 Hz znajdujących się w strefie I (rys. 7).

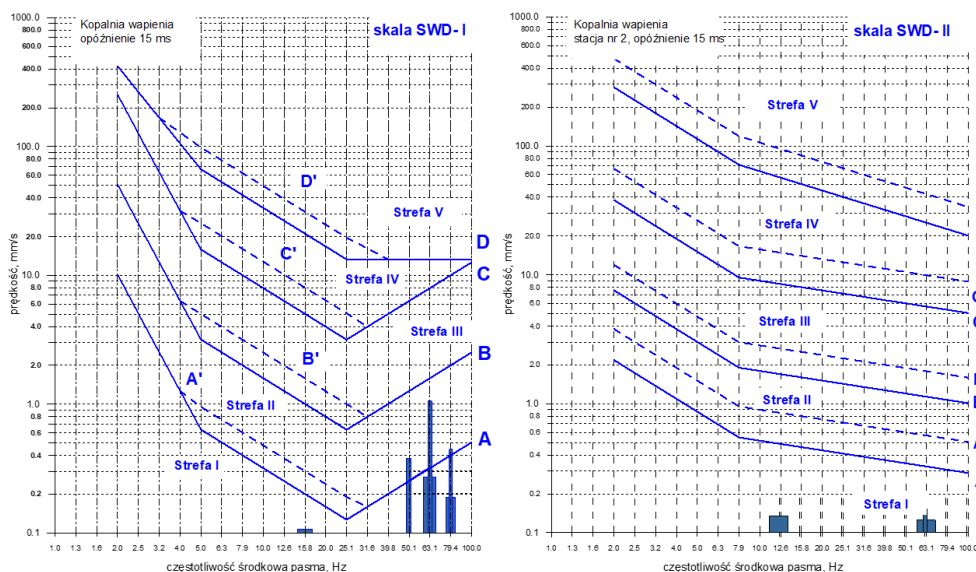


Rys. 7. Ocena oddziaływania prognozowanych drgań wzbudzonych przez serię ładunków MW z zastosowanym wariantem II (12 ms)

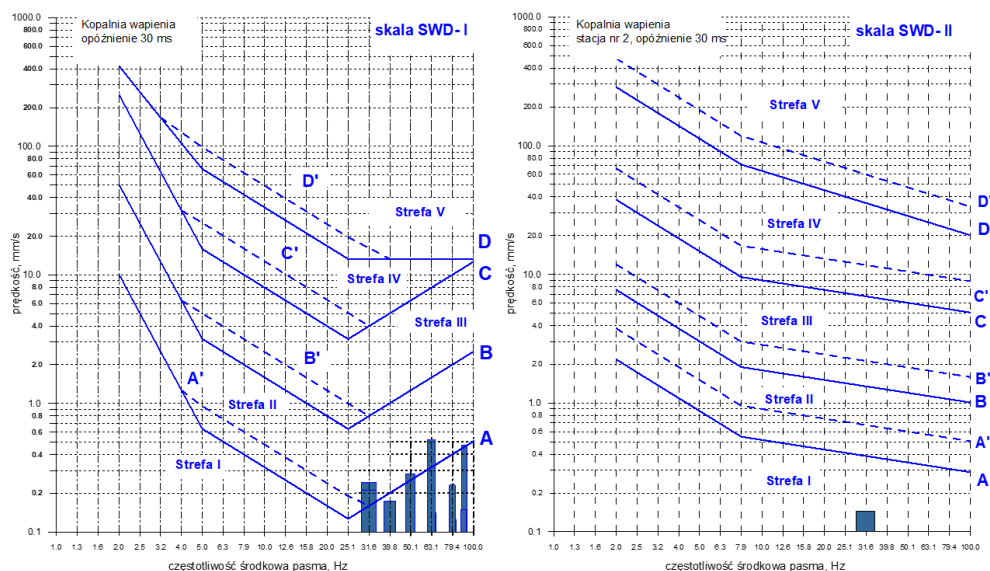
Przy zastosowaniu wariantów III (13 ms) oraz IV (15 ms) (rys. 8, 9) na stacji pomiarowej nr 1 dominują drgania o wyższych częstotliwościach, znajdujące się w strefie II, a na stacji pomiarowej nr 2 dominujące są drgania o częstotliwości 12,6 Hz (w wariantcie III) oraz 12,6 Hz i 63,1 Hz (w wariantcie IV), które w obu przypadkach znajdują się w zasięgu I strefy oddziaływania.



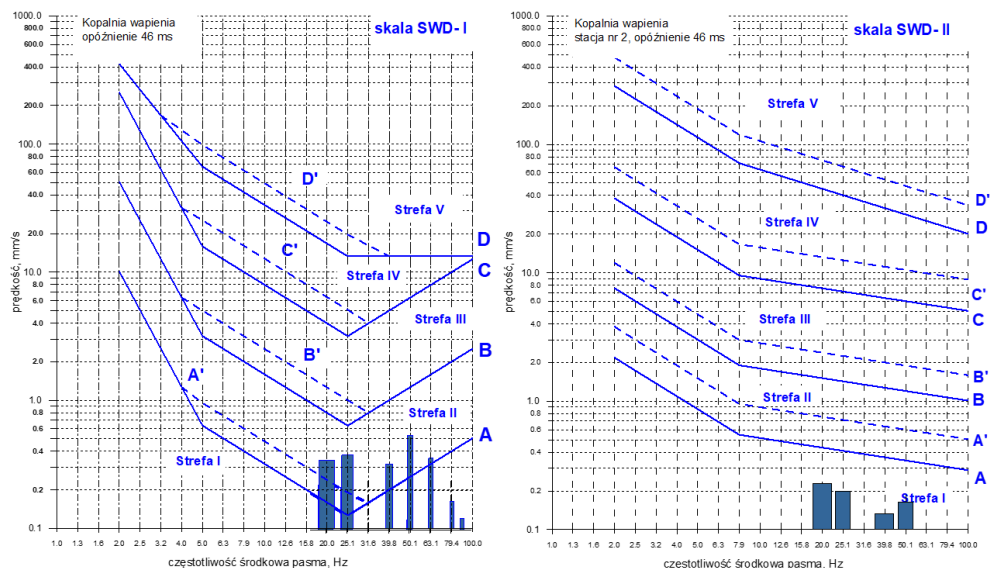
Rys. 8. Ocena oddziaływania prognozowanych drgań wzbudzonych przez serię ładunków MW z zastosowanym wariantem III (13 ms)



Rys. 9. Ocena oddziaływania prognozowanych drgań wzbudzonych przez serię ładunków MW z zastosowanym wariantem IV (15 ms)



Rys. 10. Ocena oddziaływania prognozowanych drgań wzbudzonych przez serię ładunków MW z zastosowanym wariantem V (30 ms)



Rys. 11. Ocena oddziaływania prognozowanych drgań wzbudzonych przez serię ładunków MW z zastosowanym wariantem VI (46 ms)

Wariantowi V (30 ms) odpowiadała prognozowana najniższa wartość amplitudy drgań. Prognozowane drgania wzbudzone serią ładunków MW z zastosowaniem tego wariantu na stacji pomiarowej nr 1 znalazły się w strefie II, a dominujące częstotliwości wynoszą 63,1 Hz oraz

około 90,0 Hz. W przypadku stacji nr 2 dominują drgania o częstotliwości 31,6 Hz i prędkości poniżej 0,2 mm/s, znajdujące się w I strefie oddziaływania (rys. 10).

W wariancie VI (46 ms) na stacji pomiarowej nr 1 prognozowane drgania mieszczą się maksymalnie w strefie II. W tym przypadku dominują częstotliwości z zakresu 20,0–63,1 Hz. Na stacji pomiarowej nr 2 dominują częstotliwości drgań 20,0 Hz i 25,1 Hz zawierające się w strefie I (rys. 11).

4. PODSUMOWANIE I WNIOSKI

Rozwój technologiczny w zakresie wykonywanych robót strzałowych, m.in. w postaci modernizacji systemów inicjowania ładunków MW czy wprowadzenia mechanicznego systemu ładowania, wiąże się ze stworzeniem nowych możliwości wpływania w większym stopniu na przebieg prowadzonych robót strzałowych, poprawę ich bezpieczeństwa oraz zwiększenie efektywności urabiania calizny skalnej.

Prowadzenie działań profilaktycznych jest kluczowe dla pozyskania informacji na temat oddziaływania robót strzałowych na otoczenie kopalni. Monitorowanie drgań umożliwia analizę sygnału indukowanych drgań parasejsmicznych, co z kolei pozwala na przeprowadzenie oceny ich negatywnego oddziaływania zgodnie z kryteriami zawartymi w normie [8].

Stosowanie opóźnienia milisekundowego pomiędzy kolejno odpalającymi ładunkami MW wpływa na efekt sejsmiczny związany z ich detonacją. Dobór optymalnego opóźnienia pozwala na obniżenie intensywności oddziaływania wzbudzanych drgań. Dzięki odpowiedniemu zaprojektowaniu siatki ładunków MW można uzyskać bardzo wysokie tłumienie drgań podczas ich przejścia z podłoża do fundamentu budynku. Trzeba równocześnie podkreślić, że nierozważny dobór opóźnienia, niepoprzedzony badaniami, może spowodować efekt odwrotny, czyli zwiększenie poziomu negatywnego oddziaływania wzbudzanych drgań.

Stosowanie nowoczesnych systemów inicjacji ładunków MW, w postaci systemu elektronicznego, np. Unitronic 600, daje szerokie możliwości związane z projektowaniem siatek wielootworowych, m.in. pod kątem doboru opóźnień milisekundowych. System elektronicznej inicjacji umożliwia poprawę jakości wykonywanych robót strzałowych oraz zmniejszenie efektu sejsmicznego detonacji ładunków MW w serii. Charakteryzuje się on bowiem bardzo wysoką precyzją zadawanych opóźnień i możliwością doboru opóźnień z szerokiego zakresu.

W celu doboru i zastosowania optymalnego opóźnienia, oprócz wprowadzenia systemu elektronicznej inicjacji, opracowane zostały komputerowe oprogramowania wspomagania robót strzałowych, takie jak SeisDel, oraz analityczne metody prognozy oddziaływania indukowanych drgań. Jedną z nich jest *signature hole*. Opiera się ona na rejestracji sygnału drgań wzbudzanych inicjacją pojedynczego ładunku MW, na podstawie której na dalszym etapie przeprowadzana jest symulacja odpalenia serii ładunków MW, które detonowane są w określonym odstępie czasowym względem siebie.

Przeprowadzenie analizy metodą *signature hole* umożliwia oprogramowanie SeisDel. Na podstawie danych bazowych, w postaci zarejestrowanego sygnału drgań wzbudzonych

pojedynczym ładunkiem MW (na fundamencie budynku), zakresu analizowanych czasów opóźnienia i liczby ładunków, opracowuje się symulację przebiegu drgań wzbudzonych serią ładunków MW opóźnionych względem siebie, dla każdego z poszczególnych czasów opóźnienia z zadanego zakresu. Następny etap to zastosowanie filtrowania trzecjowego oraz przeprowadzenie oceny oddziaływania. Efektem finalnym jest zaprezentowanie wyników analizy na skali SWD. Oprogramowanie pozwala na wybór rzeczywistego opóźnienia między kolejno odpalnymi ładunkami MW na podstawie wartości szczytowej prędkości drgań.

Analizując poszczególne przebiegi drgań wraz z prognozą ich oddziaływania, zdecydowano się zastosować wariant I, któremu odpowiada wartość rzeczywistego opóźnienia milisekundowego pomiędzy kolejno detonowanymi ładunkami MW równa 9 ms. Jest on potencjalnie korzystny ze względu na niskie prędkości drgań oraz najniższe wartości parametrów drgań względem poszczególnych stref, maksymalnie na granicy stref I i II.

Prognoza oddziaływania na otoczenie, oparta na analizie wyników pomiaru intensywności drgań wzbudzonych pojedynczym ładunkiem MW, umożliwiła dobór potencjalnie optymalnego opóźnienia. Należy jednak podkreślić, że jest to jedynie prognoza, która koniecznie powinna zostać zweryfikowana przez pomiar rzeczywistego oddziaływania drgań wzbudzonych zdetonowaniem ładunków MW w zaprojektowanej siatce otworów strzałowych. Dopiero wtedy możliwe będzie porównanie oddziaływania względem detonowanych w przeszłości seriach produkcyjnych i ocena intensywności indukowanych drgań [11].

LITERATURA

- [1] Onderka Z., Sieradzki J., Winzer J., *Wpływ robót strzelniczych na otoczenie kopalń odkrywkowych*, Uczelniane Wydawnictwa Naukowo-Dydaktyczne AGH, Kraków 2003.
- [2] *Ustawa z dnia 27 kwietnia 2001 r. – Prawo ochrony środowiska*. Dz.U. 2001 nr 62, poz. 627 z późn. zm.
- [3] *Ustawa z dnia 9 czerwca 2011 r. – Prawo geologiczne i górnicze*. Dz.U. 2011 nr 163, poz. 981 z późn. zm.
- [4] Pyra J., Sołtys A., Winzer J., *Monitoring the impact of blasting operations on the environment – new solutions*, Materiały Wysokoenergetyczne – High Energy Materials, nr 11, iss. 1, 2019, s. 56–65.
- [5] Sołtys A., *Metodyka doboru opóźnień milisekundowych w celu minimalizacji oddziaływania drgań wzbudzanych robotami strzałowymi na obiekty budowlane*, Rozprawy Monografie, 370, Wydawnictwa AGH, Kraków 2021.
- [6] *Electronic Blasting System Unitronic 600: Ideal System for Smaller Mining Operations*, Orica, <https://www.orica.com/products-services/initiating-systems/uni-tronic-600> [dostęp: 28.10.2023].
- [7] Pyra J., Sołtys A., Winzer J., *Kopalniana stacja monitoringu drgań KSMD APN*, Górnictwo Odkrywkowe, R. 56, nr 1, 2015, s. 47–56.
- [8] PN-B-02170:2016-12, *Ocena szkodliwości drgań przekazywanych przez podłoże na budynki*, Polski Komitet Normalizacyjny, Warszawa 2016.

- [9] Anderson D.A., Brinckerhoff P., *Signature hole blast vibration control – Twenty years hence and beyond*, [w:] *Proceedings of the Thirty-Fourth Annual Conference on Explosives and Blasting Technique, January 27–30, 2008, New Orleans, LA, USA. Vol. 2*, International Society of Explosives Engineers, Cleveland 2008, s. 2–12.
- [10] Blair D.P., *Charge weight scaling laws and the superposition of blast vibration waves*. *Fragblast*, International Journal for Blasting and Fragmentation, vol. 8, no. 4, 2004, s. 221–239, <https://doi.org/10.1080/13855140412331291610>.
- [11] Adamczyk K., *Dobór opóźnień milisekundowych w aspekcie minimalizacji oddziaływania robot strzałowych wykonywanych z użyciem elektronicznego systemu inicjowania Unitronic w odkrywkowych zakładach górniczych*, Akademia Górniczo-Hutnicza, Kraków 2024 [praca dyplomowa inżynierska].

Alicja Bednarek*, Maksymilian Zarychta, Rafał Czompelik*****

BADANIE WPŁYWU WARUNKÓW ŚRODOWISKOWYCH NA PARAMETRY PRACY WODOROWEGO OGNIWA PALIWOWEGO PEM

W pracy przedstawiono wyniki analizy wpływu warunków środowiskowych na parametry pracy ogniwa paliwowego PEM zastosowanego w prototypowym pojeździe HYDRIVE. Zakres badań obejmował analizę parametrów pracy układu w warunkach dostarczenia dodatkowego chłodzenia sprężonym powietrzem, w warunkach zwiększonej wilgotności bezpośredniego otoczenia ogniwa oraz w przypadku odłączonego zaworu przedmuchiwanie wodorem. Otrzymane wyniki wskazują na występowanie istotnych zmian sprawności badanego ogniwa paliwowego, w tym jej spadek o 5% względem wcześniejszych testów. Zidentyfikowano potrzebę optymalizacji zużycia wodoru oraz możliwość modernizacji systemu, która zwiększy sprawność układu, a tym samym przyczyni się do uzyskania poprawy osiągnięć bolidu.

RESEARCH ON THE IMPACT OF ENVIRONMENTAL CONDITIONS ON THE OPERATING PARAMETERS OF A PEM HYDROGEN FUEL CELL

The study presents the results of an analysis of the impact of environmental conditions on the performance parameters of a PEM fuel cell used in the prototype HYDRIVE vehicle. The scope of the research included an evaluation of the system's performance under additional cooling with compressed air, increased ambient humidity around the fuel cell, and the disconnection of the hydrogen purging valve. The obtained results indicate significant changes in the efficiency of the tested fuel cell, including a 5% decrease compared to previous tests. The study identified the need for hydrogen consumption optimization and the potential for system modernization, which could enhance efficiency and contribute to improved vehicle performance.

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

** AGH Akademia Górniczo-Hutnicza, Wydział Inżynierii Mechanicznej i Robotyki, Koło Naukowe Konstruktorów MechatykiCAD.

*** AGH Akademia Górniczo-Hutnicza, Wydział Energetyki i Paliw, Koło Naukowe Konstruktorów MechatykiCAD.

1. WSTĘP

W obliczu zmian klimatycznych oraz konieczności redukcji emisji gazów cieplarnianych zadaniem naukowców i inżynierów jest między innymi poszukiwanie alternatywnych źródeł energii. Jednym z istotnych kierunków badań staje się również opracowywanie wysokoefektywnych i niskoemisyjnych rozwiązań w dziedzinie transportu. W tym kontekście członkowie Koła Naukowego Konstruktorów MechaCAD prowadzą badania nad zastosowaniem ogniwa paliwowego wykorzystującego wodór jako nośnik energii. Rysunek 1 ukazuje pojazd przygotowywany na przestrzeni lat przez członków Koła Naukowego podczas przejazdu na torze.



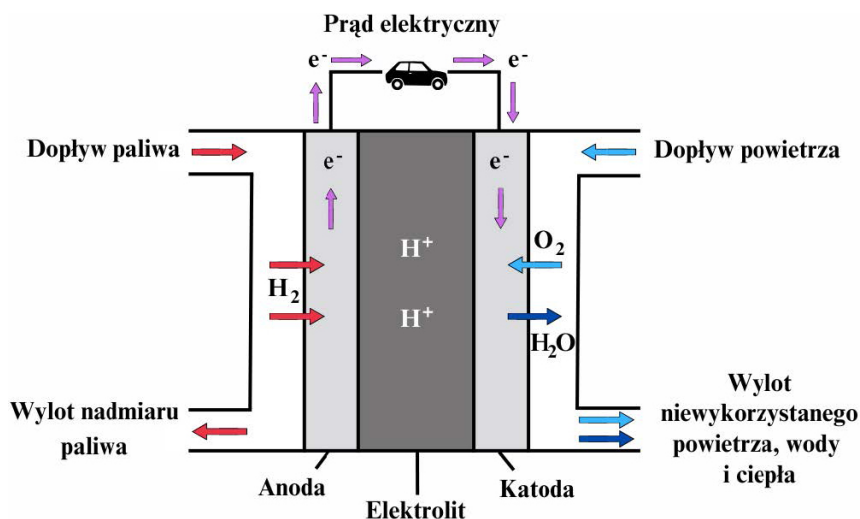
Rys. 1. Bolid HYDRIVE napędzany ogniwem wodorowym [1]

Zasada funkcjonowania ogniwa wodorowego polega na rozpadzie cząsteczek wodoru w anodzie na elektrony i protony. Protony migrują przez membranę do katody, na której łączą się z tlenem z powietrza, co prowadzi do powstania wody i wydzielania ciepła. Elektrony, nie mogąc przejść przez membranę, przemieszczają się przez zewnętrzny obwód i generują prąd elektryczny. Kontrolowany przepływ elektronów i protonów w ogniwie paliwowym umożliwia konwersję energii chemicznej na energię elektryczną. Proces uzyskania energii elektrycznej z wodoru został przedstawiony na rysunku 2 [2].

Zastosowanie wodoru w ogniwach paliwowych PEM (*Proton-Exchange Membrane*) stało się jednym z kluczowych rozwiązań umożliwiających skuteczne przejście od paliw kopalnych do zrównoważonych źródeł energii [3]. Koło Naukowe Konstruktorów MechaCAD aktywnie działa na rzecz rozwoju zrównoważonego transportu. Realizując badania i pracując nad projektem, zespół dąży do udoskonalania nowoczesnych technologii napędowych i zwiększenia ich efektywności.

Głównym celem podjętych badań było zidentyfikowanie możliwości zwiększenia wydajności ogniwa paliwowego PEM. Wysoka sprawność ogniw paliwowych jest niezbędna w kontekście udziału bolidu HYDRIVE w międzynarodowych zawodach Shell Eco-marathon promujących innowacyjne i energooszczędne rozwiązania mobilne. W związku z tym wskazano na

potrzebę zbadania wpływu warunków środowiskowych na parametry pracy ogniwa, w tym zwiększonej wilgotności powietrza dostarczonego do ogniwa, dodatkowego chłodzenia sprężonym powietrzem oraz ograniczonego dopływu wodoru. Członkowie koła MechaNICAD już wcześniej prowadzili badania nad wpływem tych czynników, co pozwoliło na zgromadzenie istotnych danych dotyczących optymalizacji pracy ogniwa.



Rys. 2. Schemat przedstawiający przemianę wodoru w energię elektryczną PEM [2]

Utrzymanie optymalnej temperatury jest istotne dla długotrwałej i efektywnej pracy ogniwa. Ma ona kluczowy wpływ na jego wydajność, ponieważ niższe temperatury zmniejszają ryzyko zużycia membran oraz występowania tzw. przedmuchów, które mogą prowadzić do uszkodzenia ogniwa. Membrana w ogniwie PEM jest szczególnie wrażliwa na wysokie temperatury, które mogą przyspieszać jej degradację.

Zawór upustowy odgrywa ważną rolę w układzie wodorowym, ponieważ umożliwia pozbycie się nadmiaru wody oraz zanieczyszczeń powstałych w czasie pracy ogniwa. Nadmiar wody może prowadzić do zbytniego przesycenia membrany, co negatywnie wpływa na ogólną wydajność ogniwa. Zastosowanie zaworu upustowego umożliwia utrzymanie optymalnych warunków jego pracy.

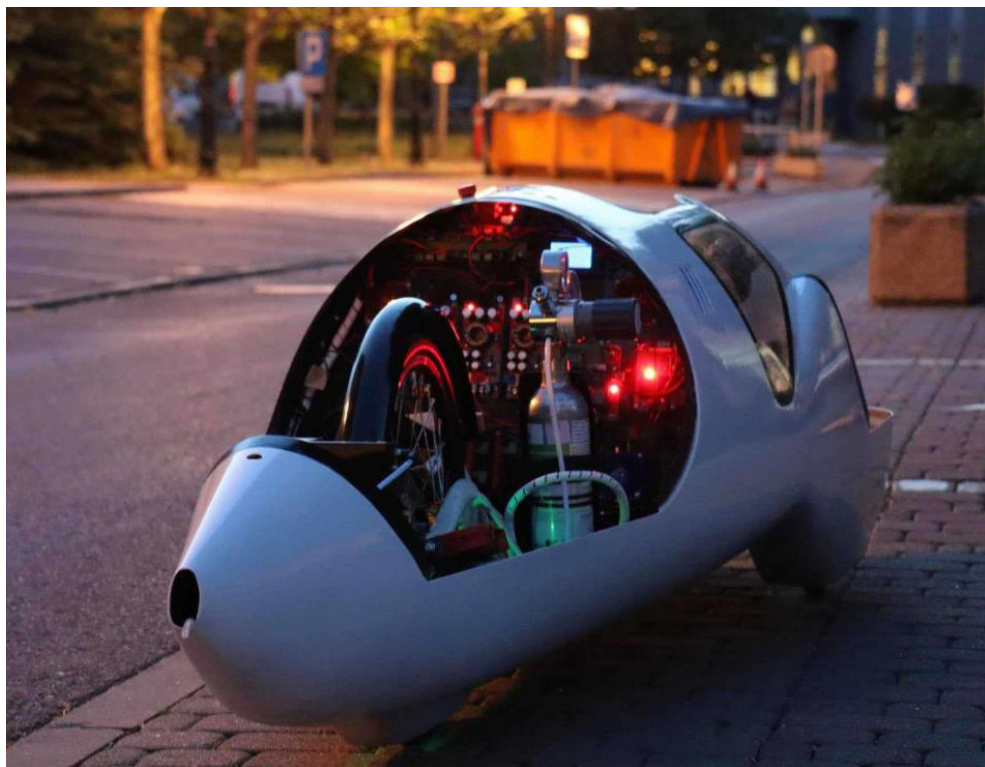
Wilgotność powietrza dostarczanego również ma znaczący wpływ na warunki pracy ogniw paliwowych. Zbyt niska może prowadzić do wysychania membrany, a zbyt wysoka – do nadmiernego gromadzenia się wody na membranie.

Przedstawione w artykule wyniki badań obejmują ocenę wpływu wyżej wymienionych czynników na funkcjonowanie ogniwa. Działania Koła Naukowego Konstruktorów MechaNICAD koncentrują się na zwiększeniu sprawności niskotemperaturowego ogniwa wodorowego PEM. Usprawnienia zostały przeprowadzone w wyniku modyfikacji układu doprowadzenia wodoru oraz warunków środowiskowych wokół ogniwa.

2. CEL PRACY

Celem pracy jest przedstawienie wyników badań wpływu zmiany warunków środowiskowych oraz modyfikacji układu doprowadzenia wodoru na parametry pracy niskotemperaturowego ogniwa paliwowego PEM. Przeprowadzone eksperymenty miały na celu ocenę zmian w wydajności i stabilności pracy ogniwa w zmiennych warunkach operacyjnych. Przeanalizowano efekty: zablokowania zaworu upustowego (purge), zastosowania zwiększonego ciśnienia powietrza dostarczonego do ogniwa w celu usprawnienia reakcji chemicznej oraz zwiększenia wilgotności powietrza dostarczonego do ogniwa.

Rysunek 3 przedstawia pojazd Hydrive, który został przygotowany do testowych przejazdów. Przedmiotem analiz jest ogniwo paliwowe PEM zastosowane w pojeździe HYDRIVE. Wykorzystano ogniwo wodorowe H-500 XP Fuel Cell marki Horizon o mocy 500 W [4]. Jest to niskotemperaturowe ogniwo paliwowe, które charakteryzuje się wysoką sprawnością energetyczną i kompaktową konstrukcją, co czyni je idealnym rozwiązaniem do zastosowań w małych pojazdach. Ogniwo to wykorzystuje membranę polimerową (PEM) do przewodzenia protonów, co umożliwia efektywną konwersję energii chemicznej wodoru na energię elektryczną.



Rys. 3. Zdjęcie układu doprowadzenia wodoru w bolidzie HYDRIVE [1]

3. METODYKA BADAŃ

Wpływ warunków środowiskowych na parametry pracy wodorowego ogniwa paliwowego PEM badano w serii trzech eksperymentów. Ich celem było przeprowadzenie analizy zmian wydajności ogniwa oraz zużycia wodoru w różnych warunkach eksploatacyjnych.

Wariant (a): badanie wpływu zmiany wilgotności dostarczonego powietrza na sprawność ogniwa

Badania przeprowadzono przy użyciu prototypowej dyszy, która umożliwiła zwiększenie wilgotności dostarczonego powietrza. Badanie miało na celu określenie możliwości kontroli sprawności układu przez sterowanie wilgotnością. Eksperyment miał nie tylko zidentyfikować wpływ tych czynników na sprawność ogniwa, ale także posłużyć opracowaniu rozwiązań optymalizacyjnych, które mogłyby przyczynić się do zwiększenia wydajności układu. Wyniki tych analiz mają istotne znaczenie dla dalszego rozwoju technologii wodorowych, szczególnie w kontekście ich zastosowania w transporcie, gdzie wymagana jest wysoka niezawodność i efektywność energetyczna.

Wariant (b): ocena wpływu dostarczenia do ogniwa powietrza pod zwiększonym ciśnieniem na sprawność ogniwa

Doprowadzenie do ogniwa sprężonego powietrza skutkowało wzbogaceniem mieszanki gazów zasilających ogniwo, ponadto rozprężanie gazu powodowało dodatkowe chłodzenie membrany ogniwa. Co więcej, chłodzenie sprężonym powietrzem wprowadzono w celu poprawy stabilności termicznej układu, kluczowej dla utrzymania optymalnych warunków pracy ogniwa.

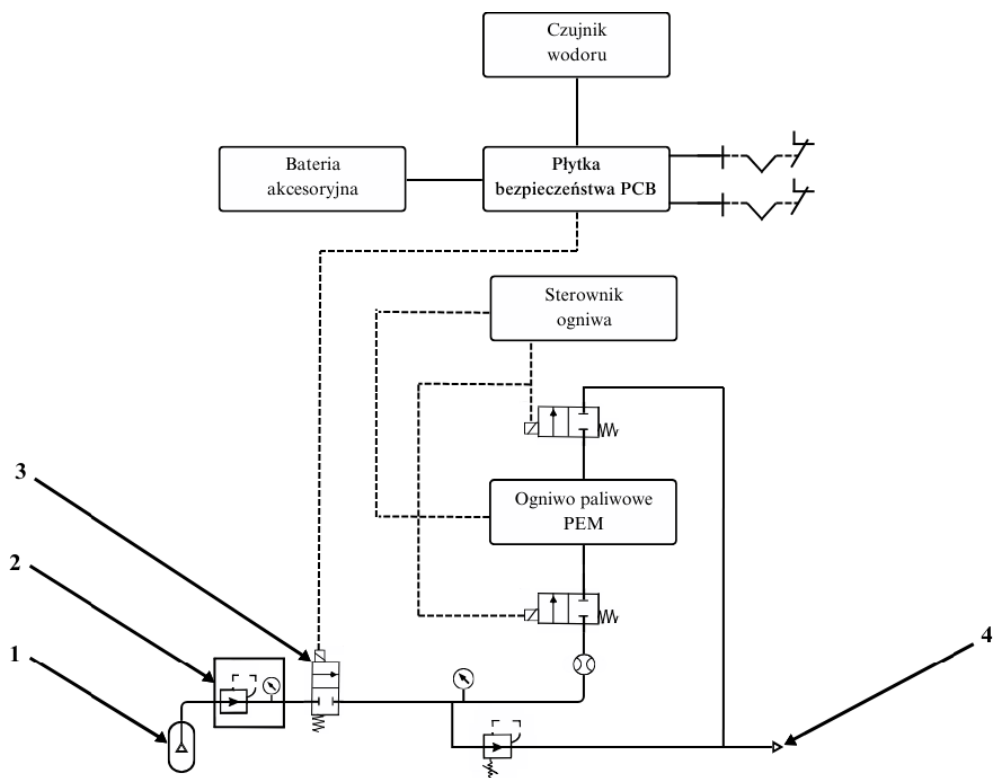
Wariant (c): ocena wpływu odłączenia zaworu upustowego na sprawność ogniwa

W ramach badań podjęto decyzję o odcięciu zaworu upustowego (4) (zob. rys. 4), co pozwoliło na wyeliminowanie zjawiska przedmuchów ogniwa. Celem badania było przeprowadzenie oceny parametrów pracy ogniwa przy ograniczonej liczbie przedmuchów.

Schematy układów doprowadzenia wodoru

Na rysunkach 4 oraz 5 przedstawiono schematy układów doprowadzających wodór, które zostały zastosowane podczas badań.

Na rysunku 4 przedstawiono schemat układu doprowadzenia wodoru w jego podstawowej wersji. Wodór jest dostarczany z zasobnika (1) do układu przez reduktor (2), który reguluje ciśnienie gazu do wartości optymalnych dla pracy ogniwa. Następnie wodór przepływa przez czujniki ciśnienia (3), które monitorują stan układu, zapewniając bezpieczeństwo i kontrolę procesu. W przypadku wykrycia nieprawidłowości układ bezpieczeństwa może automatycznie odciąć dopływ wodoru. Wodór trafia do ogniwa paliwowego, gdzie zachodzi reakcja elektrochemiczna, generująca energię elektryczną. Nadmiar wodoru oraz para wodna są usuwane z układu przez zawór upustowy (4), co zapobiega gromadzeniu się niepożądanych substancji w systemie.

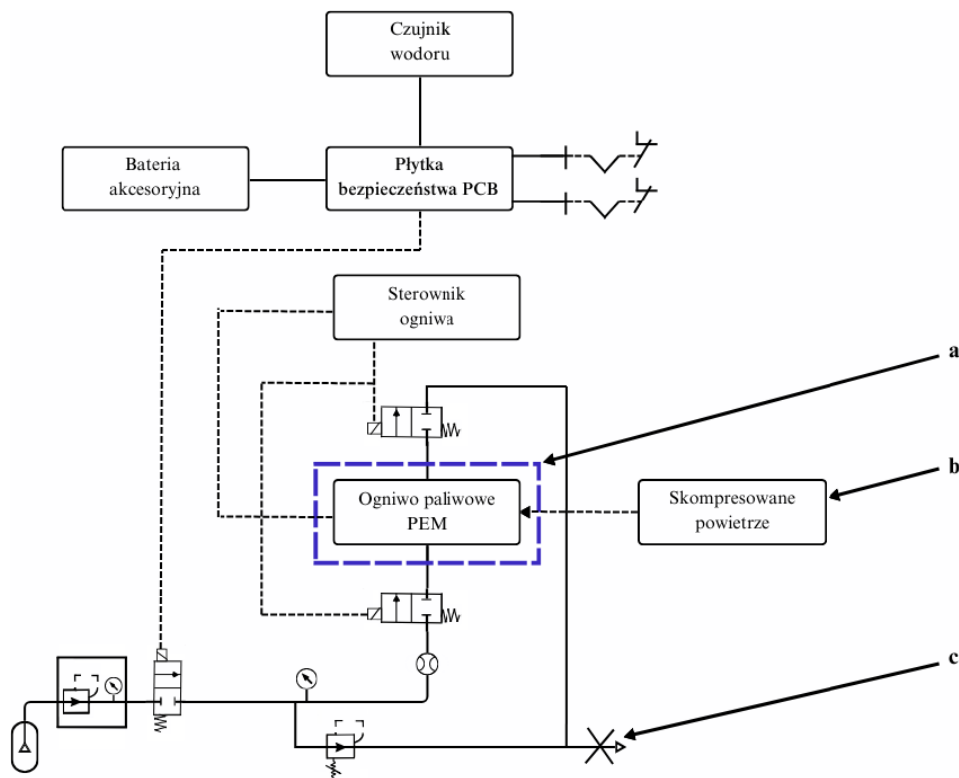


Rys. 4. Schemat układu doprowadzenia wodoru bez modyfikacji. Objasnienia w tekście

W tabeli 1 przedstawiono warianty modyfikacji układu doprowadzenia wodoru oznaczone na schemacie (rys. 5). Wariant (a) odnosi się do zwiększenia wilgotności powietrza dostarczonego do ogniwa. Ta modyfikacja ma na celu zbadanie, jak zmiana wilgotności wpływa na efektywność i stabilność pracy ogniwa. Wariant (b) wskazuje na zastosowanie sprężonego powietrza, które jest używane do wspomagania procesów w ogniwie paliwowym, szczególnie w celu poprawy wymiany gazowej i usprawnienia reakcji chemicznych zachodzących w ogniwie. Ta modyfikacja może wpłynąć na zwiększenie wydajności ogniwa. Wariant (c) dotyczy zablokowania zaworu upustowego. Ta modyfikacja ma na celu ukazanie, czy zablokowanie zaworu spowoduje zmniejszenie zużycia wodoru w trakcie jazdy bolidu.

Tabela 1. Modyfikacje układu doprowadzenia wodoru przedstawione na rysunku 5

Wariant	Modyfikacja
(a)	zwiększenie wilgotności powietrza dostarczonego do ogniwa
(b)	zastosowanie sprężonego powietrza
(c)	zablokowanie zaworu upustowego



Rys. 5. Schemat układu doprowadzenia wodoru z modyfikacjami

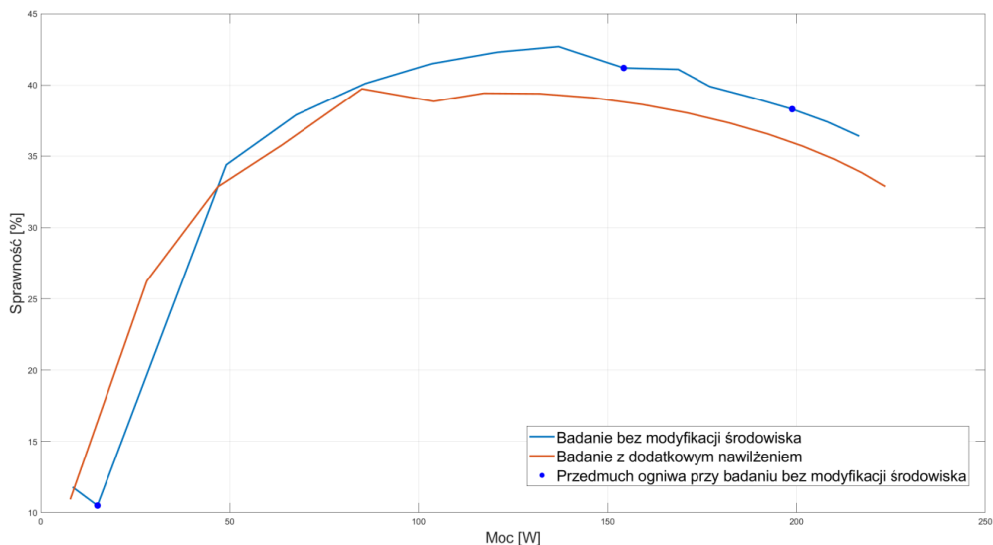
4. WYNIKI BADAŃ

4.1. WYNIKI BADAŃ WPŁYWU ZWIĘKSZONEJ WILGOTNOŚCI POWIETRZA DOSTARCZANEGO DO OGNIWA NA JEGO SPRAWNOŚĆ

Pierwszy etap badań obejmował analizę wpływu podwyższonej wilgotności środowiska wokół ogniwa paliwowego na jego wydajność, stabilność pracy oraz zużycie wodoru. W tym celu zastosowano specjalnie przygotowaną dyszę, która została nawilżona od wewnątrz wodą destylowaną, co umożliwiło stopniowe zwiększenie wilgotności w pobliżu membran ogniwa. Założeniem tego testu było określenie, czy wzrost wilgotności prowadzi do obniżenia sprawności systemu.

Przeprowadzone badania dostarczyły istotnych informacji na temat wpływu warunków środowiskowych na pracę wodorowego ogniwa paliwowego PEM, co może stanowić podstawę do optymalizacji systemów zasilania w pojazdach wykorzystujących tę technologię.

Na rysunku 6 przedstawiono wykres zależności sprawności ogniwa paliwowego od mocy dla dwóch wariantów badawczych: bez modyfikacji środowiska oraz z dodatkowym nawilżeniem. Krzywe pokazują, jak zmienia się sprawność ogniwa w zależności od mocy, a zaznaczone punkty odnoszą się do przedmuchów ogniwa w warunkach bez modyfikacji środowiska.



Rys. 6. Porównanie wyników uzyskanych w badaniach sprawności ogniwa w dwóch wariantach: bez modyfikacji środowiska oraz z dodatkowym nawilżeniem

W przypadku zwiększenia wilgotności powietrza dostarczanego do ogniwa uzyskano wzrost sprawności (niskie moce obciążenia). Należy również zwrócić uwagę, że w tym badaniu nie zanotowano przedmuchów dla powietrza o zwiększonej wilgotności. Tabela 2 przedstawia przykładowe wyniki badań sprawności ogniwa wodorowego, z uwzględnieniem parametrów elektrycznych oraz mierzonego przepływu wodoru. Dane te pozwalają na ocenę efektywności pracy ogniwa w różnych warunkach obciążenia oraz określenie rzeczywistego zużycia paliwa w zależności od generowanej mocy.

Tabela 2. Przykładowe wyniki badań sprawności ogniwa wodorowego

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]
0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	21,5	21,5	2,1	1,1	14,3	7,2	10,06	0,4
2	19,6	39,2	3,1	1,1	14,3	24,9	23,26	0,6
3	18,9	56,7	4,1	1,1	14,3	42,4	29,71	0,8
4	18,4	73,6	5,1	1,1	14,3	59,3	33,24	1,0
5	18,5	92,6	6,2	1,2	15,6	77,0	35,97	1,2
6	18,5	111,0	7,1	1,1	14,3	96,7	38,72	1,4

Tabela 2 cd.

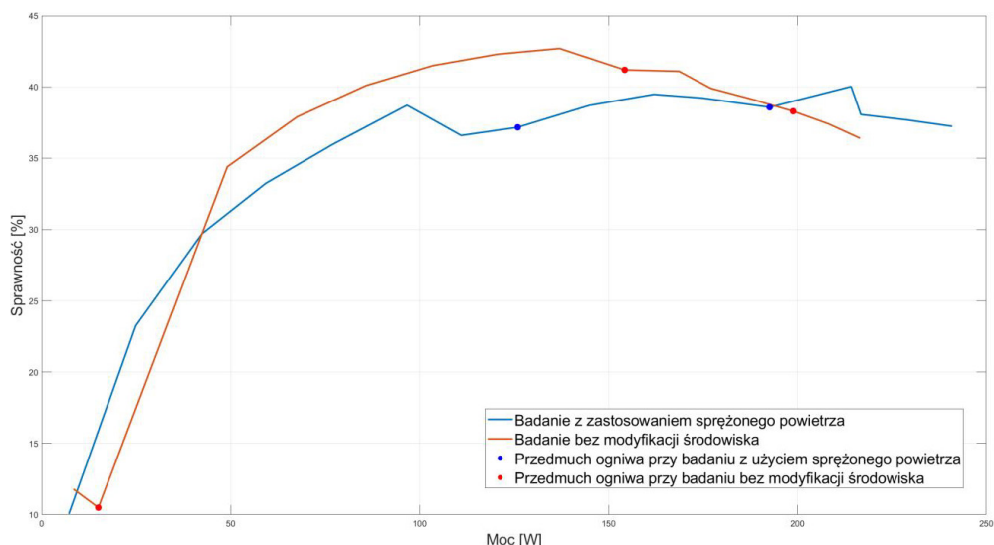
7	17,9	125,3	8,1	1,1	14,3	111,0	36,60	1,7
8	17,7	141,6	9,2	1,2	15,6	126,0	37,17	1,9
9	17,7	159,3	10,1	1,1	14,3	145,0	38,71	2,1
10	17,6	176,3	11,1	1,1	14,3	162,0	39,48	2,3
11	17,2	189,2	12,1	1,1	14,3	174,9	39,22	2,5
12	17,3	207,0	13,1	1,1	14,3	192,7	38,58	2,8
13	16,7	216,8	13,2	0,2	2,6	214,2	40,03	3,0
14	16,3	227,7	14,8	0,8	10,9	216,8	38,07	3,2
15	16	239,6	15,8	0,8	10,5	229,2	37,68	3,4
16	15,7	251,0	16,8	0,8	10,1	241,0	37,24	3,6

objaśnienia: 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]; $P_{NET} = P_{FC} - P_{PW}$ [W]

4.2. WYNIKI BADAŃ WPŁYWU CHŁODZENIA OGNIWA SPRĘŻONYM POWIETRZEM NA JEGO SPRAWNOŚĆ

Drugi typ badań dotyczył oceny efektu chłodzenia ogniwa paliwowego strumieniem sprężonego powietrza. Eksperyment przeprowadzono w warunkach stopniowego zwiększania obciążenia układu, przy jednoczesnym wykorzystaniu dodatkowego układu dostarczającego powietrze do ogniwa. Założeniem testu było sprawdzenie, czy intensyfikacja chłodzenia wpłynie na poprawę sprawności konwersji energetycznej oraz stabilność pracy ogniwa w warunkach dynamicznej eksploatacji.

Na rysunku 7 przedstawiono charakterystyki funkcji mocy obciążenia ogniwa. Badanie wykonano bez modyfikacji oraz z zastosowaniem sprężonego powietrza. W zakresie niskich mocy obciążenia wyższe sprawności uzyskano dla układu zmodyfikowanego. Jednak powyżej mocy obciążenia (powyżej 50 W) układ ten charakteryzował się nieco niższą sprawnością. Należy podkreślić, że w zakresie dużych mocy obciążenia (powyżej 200 W) widoczny jest korzystny wpływ dostarczenia powietrza o zwiększonym ciśnieniu. Punkty na wykresie obrazują etapy badania, w których nastąpił przedmuch ogniwa gazem i produktami reakcji chemicznej w ogniwie.



Rys. 7. Porównanie wyników badań sprawności ogniwa w dwóch wariantach: bez modyfikacji środowiska oraz z zastosowaniem sprężonego powietrza

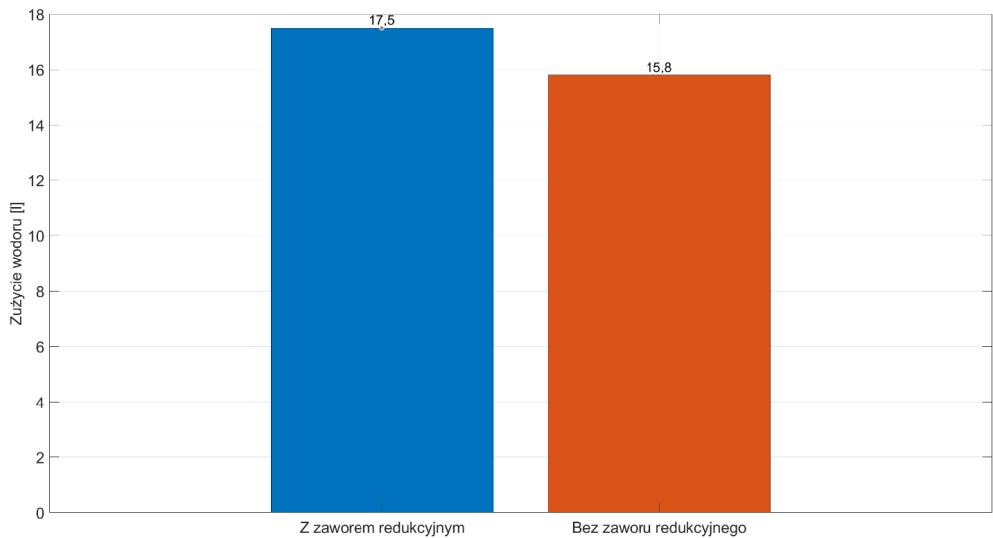
4.3. WYNIKI BADAŃ WPLYWU ZABLOKOWANEGO ZAWORU UPUSTOWEGO NA SPRAWNOŚĆ OGNIWA

Ostatni etap badań miał na celu określenie wpływu zablokowania zaworu upustowego na zużycie wodoru podczas przeprowadzonych testów jezdnych. Przepływ wodoru mierzono za pomocą przepływomierza, który zerowano przed każdym rozpoczęciem pomiaru. Pomiar zużycia wodoru przeprowadzono w cyklu trwającym 30 minut. Uzyskane wyniki przedstawiono na wykresach słupkowych (rys. 8), ilustrujących różnice w zużyciu wodoru między przypadkami bez zastosowanego zaworu i z zastosowanym zaworem. Analiza ta pozwoliła ocenić wpływ zmienionych warunków zasilania na zużycie wodoru. Głównym założeniem było ograniczenie zużycia wodoru podczas przejazdu.

Wykres przedstawia zestawienie ilości zużytego wodoru w dwóch wariantach: z zastosowaniem zaworu redukcyjnego oraz bez niego. Wartość zużycia wodoru została podana w litrach. Wariant z zaworem redukcyjnym wykazuje wyższe zużycie wodoru na poziomie 17,5 l, natomiast w przypadku odłączenia zaworu upustowego zużycie spada do 15,8 l.

Eksperyment trwał 30 minut. Przez pierwsze 150 sekund ogniwo paliwowe pracowało bez obciążenia na zasilaczu. Następnie w 30-sekundowych interwałach podłączano dodatkowe obciążenie o wartości 15 A, odpowiadające nominalnemu punktowi pracy układu. Analiza wyników pozwala na ocenę wpływu zaworu upustowego na efektywność zużycia wodoru w systemie. W tabeli 3 przedstawione zostały przykładowe wyniki pomiarów.

Zaprezentowane dane mają charakter poglądowy i służą przedstawieniu sposobu uzyskiwania danych, na podstawie których znamy zużycie stosowanego paliwa w 30-minutowym przedziale czasowym.



Rys. 8. Zestawienie ilości zużytego wodoru

Tabela 3. Przykładowe wyniki pomiarów dla testów jezdnych

Przepływ całkowity [l]	Temperatura ogniwa na końcu [°C]	Natężenie prądu na końcu [A]	Napięcie na końcu [V]
0,08	20	1,1	24,60
1,76	21	1,1	24,66
3,52	22	1,1	24,60
5,25	22	1,1	24,60
7,02	22	1,1	24,55
8,80	22	1,1	24,55
10,55	22	1,1	24,53
12,29	22	1,1	24,48
14,14	22	1,1	24,48
15,84	22	1,1	24,47
Kolejny interwał			
1,76	28	15,1	18,80
3,51	31	15,1	18,75
5,25	31	15,1	18,70
7,02	31	15,1	18,65
8,80	31	15,1	18,60
10,55	31	15,1	18,50
12,29	31	15,1	18,40
14,14	31	15,1	18,30
15,84	31	15,1	18,28

5. ANALIZA WYNIKÓW

Badania nad wpływem zwiększonej wilgotności powietrza dostarczonego do ogniwa na jego wydajność nie wykazały zwiększenia jego sprawności. Wręcz przeciwnie, odnotowano jej spadek, co sugeruje, że nadmierna wilgotność może negatywnie wpływać na transport masy i przebieg reakcji elektrochemicznych w ogniwie. Występujący gradient stężenia między anodą a katodą powoduje, że część wody jest transportowana zwrótnie przez membranę [5]. Wykorzystanie dodatkowego nawilżenia mogło doprowadzić do utrzymania się nadmiernej ilości wody w ogniwie wodorowym, co w połączeniu z zewnętrznym nawilżeniem środowiska wokół ogniwa mogło skutkować obniżeniem sprawności.

Analiza wpływu zastosowania sprężonego powietrza na wydajność ogniwa wykazała, że w początkowej fazie jego pracy uzyskiwano wyższą sprawność przy niższych mocach. Jednakże najwyższą sprawność osiągnięto w konfiguracji bez dodatkowego dopływu sprężonego powietrza. W nominalnym punkcie pracy stabilizacja i poprawa warunków operacyjnych doprowadziły do wzrostu sprawności przy zastosowaniu sprężonego powietrza. Sterownik ogniwa ograniczył liczbę przedmuchów służących do oczyszczenia ogniwa, co bezpośrednio wpływa na zmniejszenie zużycia wodoru.

Badania nad wpływem zablokowania zaworu upustowego (purge) na parametry ogniwa wykazały zmniejszenie zużycia wodoru o 14% podczas przeprowadzenia „testów jezdnych”. Jest to istotna poprawa, która przekłada się bezpośrednio na wzrost efektywności produkcji energii elektrycznej. W typowych warunkach pracy ogniwa pewna ilość wodoru jest tracona podczas procesu oczyszczania, w którym gaz jest wykorzystywany do przedmuchu. Eliminacja tej straty pozwala na bardziej efektywne wykorzystanie paliwa. Zablokowanie zaworu na to pozwala, dzięki czemu ogniwo nie wyrzuca paliwa w atmosferę. W celu zapobiegania „zabrudzeniu” ogniwa, przed każdym startem oraz testem jest ono dokładnie czyszczone zgodnie z zaleceniami producenta. W rezultacie przez kilkadziesiąt minut pracy może ono swobodnie pracować bez konieczności samoczynnego oczyszczania.

6. PODSUMOWANIE

Przeprowadzone badania pozwoliły na ocenę wpływu wybranych warunków środowiskowych na parametry pracy wodorowego ogniwa paliwowego PEM zastosowanego w pojeździe HYDRIVE. Dostarczyły również cennych informacji na temat optymalnych warunków pracy ogniwa wodorowego w zastosowaniach mobilnych. Uzyskane dane poszerzyły perspektywę możliwych zmian wprowadzanych w układzie doprowadzenia wodoru. Mogą one stanowić podstawę do dalszych prac nad poprawą wydajności oraz zwiększeniem trwałości układów zasilanych wodorem w pojazdach transportowych, co mogłoby mieć znaczenie w kontekście zarządzania warunkami eksploatacji ogniw paliwowych w rzeczywistych zastosowaniach transportowych.

LITERATURA

- [1] Opracowanie własne, Koło Naukowe Konstruktorów MechaCAD.
- [2] Tümer B., Şanlı Yıldız D., Arkun Y., *Water and thermal management in PEM fuel cells using feasible humidity plots and model predictive controllers*, Computers and Chemical Engineering, vol. 192, 2025, 108905, <https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2024.108905>.
- [3] Singer G., Pertl P., Trattner A., *Experiments on maximizing hydrogen utilization and efficiency in a PEM fuel cell system*, International Journal of Hydrogen Energy, vol. 106, 2025, s. 1158–1166, <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2025.02.036>.
- [4] Horizon, *H-500 XP Fuel Cell Stack*, <https://www.horizoneducational.com/h-500-xp-fuel-cell-stack/p1405> [dostęp: 23.02.2024].
- [5] Zhang J., Tang Y., Song C., Xia Z., Li H., Wang H., Zhang J., *PEM fuel cell relative humidity (RH) and its effect on performance at high temperatures*, Electrochimica Acta, vol. 53(16), 2008, s. 5315–5321, <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2008.02.074>.

Anna Celary*, Aleksander Szewc**

ZAPOMNIANY FAJANS WSCHODU – WYTWÓRNIE CERAMIKI W LUBYCZY KRÓLEWSKIEJ, SIEDLISKACH I POTYLICZU – HISTORIA, PRODUKCJA I WZORNICTWO

Celem artykułu jest przedstawienie zagadnienia ceramiki produkowanej w miejscowościach Lubycza Królewska, Siedliska i Potylicz leżących na obecnym pograniczu polsko-ukraińskim. Praca omawia historię powstania i dalsze losy tamtejszych manufaktur działających na przełomie XIX i XX wieku. Ukazuje różnorodność zdobień wynikającą ze zróżnicowania narodowościowego i religijnego w tych miejscowościach. Połączenie wzornictwa stosowanego przez ludność rusińską i żydowską, stanowiących większą część mieszkańców wspomnianych terenów, spowodowało powstanie motywów ludowych dekoracji roślinnych, geometrycznych zdobień i odniesień do praktyk wyznawców judaizmu.

FORGOTTEN FAIENCE OF THE EAST – CERAMIC MANUFACTORIES IN LUBYCZA KRÓLEWSKA, SIEDLISKA AND POTYLICZ – THEIR HISTORY, PRODUCE AND DESIGNS

The paper presents the issue of ceramics created in Lubycza Królewska, Siedliska and Potylicz, three towns located on the current Polish-Ukrainian border. It discusses the history of the establishment and further fate of local manufactories, which operated at the turn of the 19th and 20th centuries. It shows the variety of decorations resulting from the ethnic and religious diversity in these towns. The combination of the design traditions of the Ruthenian and Jewish populations, who were the majority of the inhabitants of the mentioned areas, led to the creation of motifs that merged elements of folk plant decorations, geometric patterns, and references to the practices of followers of the Jewish faith.

1. WSTĘP

Fajans to jeden z mniej znanych wytworów sztuki ceramicznej w Polsce. W przeciwieństwie do porcelany, używanej tylko przez najbogatsze warstwy społeczne, fajanse były wykorzystywane w życiu codziennym przez mniej zamożnych. Szczególnie ciekawe przykłady

* AGH Akademia Górniczo-Hutnicza, Wydział Humanistyczny, Koło Naukowe Ceramika Artystyczna.

** AGH Akademia Górniczo-Hutnicza, Wydział Inżynierii Lądowej i Gospodarki Zasobami, Koło Naukowe Ceramika Artystyczna.

wyrobów powstawały na przełomie XIX i XX wieku w trzech miejscowościach leżących obecnie na polsko-ukraińskim pograniczu – Lubyczy Królewskiej, Siedliskach i Potyliczu. Utworzyła się tam bardzo szczególna sztuka dekorowania naczyń, wynikająca ze zróżnicowania religijno-narodowościowego tego obszaru. Połączenie elementów religii i kultury żydowskiej wraz z motywami ludowymi ludności Rusi sprawiły, że ukształtowana tradycja twórcza stała się wyjątkowym zjawiskiem w skali światowej [1].

Niestety tematyka ta jest niemal całkowicie nieznana w Polsce, z wyjątkiem pojedynczych wzmianek w szerzej dostępnej literaturze. Polskie zbiory muzealne są bardzo niewielkie w tym zakresie i istnieje tylko kilka obiektów, które można jednoznacznie przypisać do tych trzech wytwórni. Największą skarbnicą wiedzy na ten temat pozostają bardzo szczegółowe opracowania ukraińskie, jak również zbiory lwowskiego Muzeum Etnografii i Wzornictwa Artystycznego. Posiada ono kilkadziesiąt obiektów, w części zgromadzonych i opisanych jeszcze przed drugą wojną światową przez Maksymiliana Goldsteina, wielkiego miłośnika kultury żydowskiej. Bardzo dokładną historię miejscowości, jak również wytwórni fajansu udało się odtworzyć Zdzisławowi Pizunowi i Ryszardowi Gawrysiowi, miłośnikom lokalnej historii, którzy opublikowali je w kilku własnych artykułach [2, 3].

2. RYS HISTORYCZNY POWSTANIA FABRYK FAJANSU NA TERENACH DAWNEJ GALICJI

Wiek XVIII był okresem przełomowym dla Europy pod względem wytwarzania fajansu. Wyzначył on moment przejścia z tworzenia rękodzieł do masowej produkcji. Trend ten zaczął się na zachodzie Europy i związany był z ówczesnymi zmianami społecznymi. Nowe klasy społeczne potrzebowały wyrobów na swój użytek, a wytwarzana dotąd ceramika, mająca charakter luksusowy, nie zaspokajała potrzeb rynku. Priorytetem stało się zatem znalezienie tańszych rozwiązań, dających jednocześnie możliwość masowej produkcji. Dodatkowo wyroby fajansowe zaczęto dostosowywać do potrzeb codziennego życia [4].

Zmiany zachodzące w zachodniej Europie dotarły również do Polski. Pojawiły się pierwsze próby założenia własnych fabryk. Tworzone tam wyroby miały charakter nie tylko użytkowy, ale również reprezentacyjny i były dobrami przeznaczonymi dla najbogatszych sfer społeczeństwa. Z nadejściem okresu zaborów zapotrzebowanie na luksusowe produkty spadło. Dodatkowo wydarzenia takie jak wojny napoleońskie ułatwiły przepływ informacji między różnymi społeczeństwami, co wpłynęło na zmianę stylu życia, w tym dbałości o higienę. W efekcie zapotrzebowanie na naczynia codziennego użytku wzrosło, a to przyczyniło się do powstawania kolejnych fabryk produkujących naczynia na potrzeby lokalnych mieszkańców [4]. Fajanse wytwarzane w tym okresie upowszechniły się w gospodarstwach domowych. Zdobienia wyrobów nabrały ludowego charakteru mającego związek z życiem codziennym. Użytkowy charakter wytwarzanych naczyń sprawił, że niewiele egzemplarzy przetrwało do dnia dzisiejszego, a zachowane naczynia są delikatne zarówno jeśli chodzi o materiał, z którego zostały wykonane, jak i zdobnictwo [5]. Dynamiczny rozwój tej gałęzi przemysłu nie trwał jednak długo. Konkurencja, problemy finansowe oraz pruska ustawa antyimportowa doprowadziły do upadku wielu manufaktur [4].

Jedna z pierwszych fabryk została założona w 1794 roku przez Aleksandra Augusta Zamoyskiego w Tomaszowie Lubelskim (rys. 1). Produkowała ona fajans i porcelanę. Położona była daleko od odpowiednich złóż glin, co wiązało się z takimi trudnościami jak dodatkowe koszty czy transport surowców z miejsc oddalonych nawet o 50 kilometrów. Mimo utrudnień odnosiła ona sukcesy, o czym świadczą trzy złote medale zdobyte na wystawie płodów krajowych w Warszawie przez tomaszowskie wyroby w 1821 roku [5]. Główną przyczyną upadku wytwórni było włączenie terenów, na których się znajdowała, do Księstwa Warszawskiego w 1809 roku. Pozostanie tomaszowskiej fabryki bez dostępu do surowców, które znalazły się za nowo wytyczoną granicą, zakaz austriackiego rządu sprowadzania zza granicy fajansu i porcelany oraz otwarcie nowej fabryki w Potyliczu doprowadziły do jej zamknięcia w 1827 roku [6]. W 1842 roku doszło do ponownego wznowienia produkcji przez Roberta Wendlera, ale trzy lata później zakład zbankrutował. Fajansiarnie otwarte w Lubyczy Królewskiej, Siedliskach czy Potyliczu rozwinęły swoją działalność na terenach zaboru austriackiego po zlikwidowaniu manufaktury w Tomaszowie, przejmując przy tym jej poprzedni rynek zbytu oraz surowce. Powstały w okresie sprzyjającym podejmowaniu przedsięwzięć gospodarczych w Galicji [2].



Rys. 1. Fragment mapy ukazujący położenie manufaktur ceramicznych we wschodniej części Galicji

Źródło: [5, s. 122]

3. HISTORIA MANUFAKTURY W LUBYCZY KRÓLEWSKIEJ

Początki fabryki w Lubyczy Królewskiej nie są do końca znane. W niektórych źródłach jej powstanie datuje się na 1855 rok [4], jednak wydaje się to błędne. Najprawdopodobniej została założona około 1840 roku przez barona Henryka Augusta von Leibnitza (Ziembitza), który do 1840 roku był właścicielem Lubyczy [2]. Niestety jej losy w latach 1840–1855 nie są znane, przypuszcza się, że w tym czasie mogła spłonąć. W 1855 roku lubycka manufaktura pod kierownictwem Ludwika Zielińskiego została rozbudowana i wznowiła produkcję fajansu, co w literaturze błędnie interpretowane jest jako jej założenie. Pierwszym dzierżawcą wytwórni został Szame Baumwohl [4].

Najstarsza prasowa wzmianka o tej fabryce pochodzi z 1858 roku. Kolejne potwierdzenie jej funkcjonowania w 1862 roku znajdziemy w wiedeńskim zestawieniu statystycznym „Mittheilungen aus dem Gebiete der Statistik” (za: [2]). W marcu 1865 roku lubycka wytwórnia spłonęła w całości, mimo to pod koniec 1866 roku zostaje potwierdzone jej dalsze funkcjonowanie [2]. Zakład w latach 60. XIX wieku zatrudniał 20 osób, a rocznie przerabiał od 100 do 150 korców (12 800–19 200 litrów) gliny [5]. Trzy lata później, w 1869 roku, opracowanie, będące przeglądem geograficzno-statystycznym Galicji i Bukowiny, wspomina o fabryce, która zatrudniała 22 robotników. Kilka lat po tym, w 1877 roku, periodyk „Tydzień Literacki, Artystyczny, Naukowy i Społeczny” informuje, że mimo wytwarzania pięknych fajansów i dostatecznego kapitału nieudolność zarządu wstrzymuje rozwój zakładu. W roku 1893 „Gazeta Lwowska” poinformowała o kolejnym pożarze [2]. W 1907 roku w czasopiśmie „Chemik Polski” [7] zostają wspomniane wytwórnia w Lubyczy Królewskiej, a także produkowane przez nią wyroby takie jak kubki, garnuszki, dzbanki, spodki, talerze czy półmiski fajansowe. W rozdziale „Przemysł ceramiczny Galicji” zwrócono uwagę na niedobór wermistrzów – rzemieślników nadzorujących pracę warsztatu, co uznano za główną przyczynę zamykania fabryk oraz zahamowania rozwoju innych, w tym manufaktury w Lubyczy [7].

Jednym ze źródeł wspominających o zakładzie fajansowym jest tekst Maksymiliana Goldsteina, który działalność fabryki od początku jej funkcjonowania wiąże tylko z kulturą żydowską. Informuje on o tym, że zawsze właścicielami i robotnikami byli wyłącznie Żydzi [8]. Jednak analiza historii lubyckiego majątku dokonana przez Zdzisława Pizuna oraz Ryszarda Gawrysia [2] wyraźnie wskazuje na błędne założenia Goldsteina. Na początku lubycki majątek należał do Ludwika Zielińskiego, później do pruskiej rodziny Kämpffów, a dopiero w roku 1904 fajansiarnia trafiła w ręce żydowskie, wykupiona przez Maksymiliana Parnasa [9].

W „Przeglądzie Ceramicznym” – opracowaniu dotyczącym ceramiki na ziemiach polskich – Karol Rolle wspomina w 1911 roku o lubyckiej fabryce, którą odwiedził w 1895 roku [2]. W tamtym okresie dzierżawcą wytwórni był Aszer Luft. Dzięki szczegółowym zapiskom autora odkryto, jak wyglądała fabryka w momencie wizyty inżyniera. Zakład zatrudniał 30 robotników, a jego infrastruktura obejmowała budynek główny oraz dwa zabudowania – pierwsze na młyn wodny i drugie służące do odmulania gliny, wyposażone w piec do suszenia glin [2]. W budynku znajdowały się trzy kadzie do odmulania gliny, która po wysuszeniu była wielokrotnie ugniatana nogami. Główny piec do pierwszego wypalania surowca miał konstrukcję piętrową i wymiary $2\text{ m} \times 1,5\text{ m} \times 2\text{ m}$. Oprócz niego funkcjonowały także dwa mniejsze piece przeznaczone do wypalania wyrobów szkliwionych. Proces pierwszego wypalania trwał około 25 godzin i wymagał zużycia czterech sągów drewna (około 16 m^3), natomiast drugie wypalanie (ze szkliwem) zajmowało 7 godzin. Pracownik był w stanie wyprodukować dziennie około 200 talerzy, które sprzedawano po 2 centy za sztukę [2].

Wzmianka Rollego obala twierdzenie Goldsteina o tym, że w farfurni pracowali tylko Żydzi. Wspomina on, że zatrudniano nie tylko Żydów, ale również miejscowych ruskich chłopów [2]. Fabryka faktycznie odpowiadała swoimi wyrobami na potrzeby ludu żydowskiego [8], co nie powinno dziwić, gdyż ludność ta jeszcze w 1921 roku stanowiła aż 90% mieszkańców wsi [9]. Fajansiarnia nie zapominała też o nieżydowskim, okolicznym ludzie, produkując również przedmioty użytkowe [5]. Najprawdopodobniej ostatnim dzierżawcą został Salomon Gottlieb. W 1911 roku zakład został zniszczony przez pożar i nigdy nie odbudowano go

w pełni. Dopiero po zlikwidowaniu zakładu należycie doceniono wyroby z Lubyczy Królewskiej na wystawie ceramiki i szkła polskiego organizowanej przez Towarzystwo Opieki nad Zabytkami Przeszłości w Warszawie w 1913 roku [1].

4. FORMY, KOLORYSTYKA I WZORNICTWO WYROBÓW MANUFAKTURY W LUBYCZY KRÓLEWSKIEJ

Mimo że wytwórnia działała kilkadziesiąt lat, większość zachowanych wyrobów pochodzi z końcowego okresu jej produkcji, kiedy była już dzierżawiona przez żydowskich najemców [2]. Zapewne jest to spowodowane kruchością i delikatnością wytwarzanych wyrobów, a także licznymi pożarami, które często nawiedzały zakład. Niszczyły one wiele gotowych naczyń i powodowały przestoje w produkcji, zwłaszcza na początkowym etapie działalności manufaktury. Już w latach przedwojennych pierwszy kolekcjoner ceramiki lubyckiej tak pisał o jej wyrobach: „Niektóre eksponaty w tym zbiorze są prawdopodobnie unikatami, gdyż w domach prywatnych mnóstwo się tego naczynia potłukło, a fabryka od lat jest nieczynna” [8, s. 8].

Paleta barw dekoracji ceramiki lubyckiej jest uboga (rys. 2) z powodu ograniczonej dostępności surowców mineralnych w najbliższej okolicy. Naturalnym kolorem wyrobu był kolor kremowy z uwagi na obecności tlenków żelaza(III) w lokalnie wydobywanej glinie. Barwnik zielony powstawał przy użyciu tlenku miedzi(I), a barwnik czerwony przy użyciu tlenku żelaza (III). Błękit uzyskiwany był dzięki zastosowaniu tlenku kobaltu(III) – podobnie jak ma to miejsce obecnie przy produkcji znanej ceramiki bolesławieckiej [5]. Całość pokrywana była szkliwem ołowiowym niskotopliwym, tworzącym gładką powierzchnię. Powód jego użycia był dość prosty – w czasach działalności wytwórni nie istniała technologia pozwalająca na uzyskanie wysokich temperatur w piecach.



Rys. 2. Kolorystyka wyrobów z Lubyczy Królewskiej.

Misa z ornamentami geometrycznymi połączonymi z motywami roślinnymi

Źródło: [materiały własne]

Duża część produkowanych wyrobów miała dekoracje związane z religią i kulturą żydowską. Wyroby te były przeznaczone w większości na potrzeby ludu żydowskiego podczas rozmaitych świąt religijnych [5].

Na szczególną uwagę zasługiwały misy sederowe (rys. 3, rys. 4), używane przez diasporę żydowską przez pierwsze dwa wieczory święta Paschy. Obchodzono je na pamiątkę wyjścia Izraelitów z Egiptu. Górna część tych naczyń zawierała sześć miseczek, z których każda na dnie miała wypisaną nazwę pożywienia, jakie powinno się w niej znajdować podczas trwania kolacji sederowej. Każda z serwowanych potraw miała unikalne znaczenie, przykładowo: maror – gorzkie zioła (zwykle chrzan) przypominające gorycz niewoli, charoset – mieszanka tartego jabłka, mielonych orzechów i wina, mająca przypominać zaprawę do cegieł wyrabianych przez Żydów w niewoli egipskiej, karpas – sałata lub seler umoczone w słonej wodzie, symbolizujące łzy niewoli, bejca – jajko upieczone i posypane popiołem, symbolizujące ciężki los narodu wybranego [10]. Misa sederowa składała się z cylindrycznej podstawy o wysokości około 12 cm oraz nakładanego na nią talerza o średnicy 30 cm z sześcioma miseczkami [1]. Były one niewielkich rozmiarów, ich średnica wynosiła 6,3–6,5 cm, a wysokość 2,2–3 cm. Wnętrze samej misy używane było do przechowywania trzech mac, wykorzystywanych podczas świątecznych celebracji i oznaczających podział społeczeństwa żydowskiego na trzy grupy: kapłanów, lewitów i lud [10].



Rys. 3. Misy sederowe z manufaktury w Lubyczy Królewskiej z bogatą ornamentacją roślinną i geometryczną, ułożoną w równoległych pasach

Źródło: [8, s. 84]



Rys. 4. Nakrywy do mis sederowych manufaktury lubyckiej, widoczne hebrajskie napisy nazw świątecznych potraw umieszczanych w poszczególnych miseczkach oraz drobne dekoracje roślinne

Źródło: [8, s. 84]

Znanych jest około dziesięciu kompletów mis sederowych (rys. 5), z bardzo zróżnicowaną dekoracją malarską. Jednym z najciekawszych przykładów jest misa sederowa ze zbiorów Muzeum Żydowskiego we Lwowie, z której zachował się sam pojemnik na macę, część miseczek i zdobiona pokrywa. Pokryta jest ona dekoracjami przedstawiającymi pustynne pejzaże z pięcioma „brzegami” pozbawionymi roślinności, pośrodku których znajdowała się pojedyncza roślina taka jak agawa, kaktus czy aloes [1].



Rys. 5. Misa sederowa z manufaktury lubyckiej wraz z pojemnikiem na macę, obecnie przechowywana w Muzeum Etnografii i Rzemiosła Artystycznego we Lwowie

Źródło: Stalówka.net, Kultura Żydów Galicyjskich, <https://www.stalowka.net/wiadomosci.php?dx=559&df=1>
[dostęp: 15.02.2025]

Zachowało się też kilka talerzy sederowych (hebr. *keara*) bez pojemnika na macę. Mają dość płaską formę, z bokami o wysokości 2 cm, i były zdobione na kilka różnych sposobów: od prostych dekoracji w postaci koncentrycznych kręgów otaczających pola z napisami, przez ornamenty roślinne zarówno malowane ręcznie, jak i wykonywane techniką stemplowania, aż po ręcznie malowane wizerunki ptaków. Napisy wykonano w specjalnych wgłębieniach na miseczkach lub też na denkach samych miseczek. Czasami zamiast pełnych słów stosowano jedynie pierwsze litery nazw potraw. Część produktów była całkowicie pozbawiona napisów i pokryta jedynie dekoracją malarską [6].

Wśród wyrobów z tymi dekoracjami występowały również zdobione talerze, zarówno niewielkie, jak i duże, z napisami takimi jak „mazzal tow” (‘na szczęście’) czy „chag ha-Pesach” (‘na święto Paschy’) [8]. Inskrypcje wykonywane były w języku hebrajskim lub jidysz, niestety czasem z błędami [1]. Oprócz tego wytwarzano również dzbanki (rys. 6) w różnych kształtach i rozmiarach, służących głównie do przechowywania wina rodzynkowego na święto Paschy [8].



Rys. 6. Dzbany z manufaktury w Lubyczy Królewskiej zdobione kompozycjami roślinnymi

Źródło: [8, s. 83]

Do niezwykłych wyrobów z tej wytwórni możemy zaliczyć również ceramiczne świeczniki chanukowe, zawierające osiem zbiorniczków na oliwę (rys. 7). Często posiadały one dodatkową tylną ściankę, która uniemożliwiała zaproszenie ognia i chroniła sam płomień przed zgaśnięciem. Dekoracja malarska owego dodatkowego elementu ewoluowała od prostych kompozycji kwiatowych aż do przedstawień ptaków i innych zwierząt ważnych w kulturze żydowskiej, takich jak lew, orzeł, jeleń i lampart [11]. Nawiązywały one do żydowskiej tradycji personifikowania zwierząt i przypisywania im różnorodnych pożądanych cnót. Symbolika jest nieprzypadkowa i ma bezpośredni związek z sentencją traktatu Pirke(j) Awot (5:20), będącego jednym z traktatów Miszny: „Bądź silny jak lampart, lekki jak orzeł, szybki jak jeleń, i śmiały jak lew, żeby spełnić wolę Ojca twego w niebie” [11]. Najciekawszymi przykładami tego typu wyrobów były dwa świeczniki pochodzące z lwowskiej kolekcji Maksymiliana Goldsteina. Pierwszy z nich zdobiony był napisami i malowanym wizerunkiem jelenia, natomiast drugi rzeźbionymi lwiatkami w majestatycznych pozach [5].



Rys. 7. Lampki chanukowe wykonane z fajansu, pochodzące z manufaktury w Lubyczy Królewskiej

Źródło: [8, s. 86]

Oprócz wyrobów ściśle związanych z kulturą ludu żydowskiego powstawały także naczynia zdobione dekoracjami charakterystycznymi dla rękodziela tworzonego przez okoliczną ludność rusińską [1]. Były to głównie talerze zdobione barwnymi malaturami roślinnymi (rys. 8). Styl tych dekoracji nawiązywał do motywów ludowych, jednak układ kompozycyjny przypominał te występujące na porcelanie [5]. Ponadto dostrzec w nich można inspiracje orientalnymi arabeskami i motywami charakterystycznymi dla ukraińskiego baroku [1]. Zwykle

dekoracja ta składała się z centralnego elementu, złożonego z różnokolorowych kwiatów, liści i girland roślinnych malowanych ręcznie, śmiałymi pociągnięciami pędzla. Szybkość wchłaniania farb przez czerep sprawiała, że niemożliwe było nanoszenie poprawek. Dlatego technika ta wymagała dużego doświadczenia i uważności [4]. Poszczególne elementy rozmieszczone były bardzo harmonijnie i stosunkowo symetrycznie, co tworzyło kolistą, częściowo zamkniętą kompozycję. Była ona otoczona przez niedekorowane pole rozciągające się aż do brzegu talerza. Same obrzeża zdobione były prostymi liniami oraz powtarzalnymi drobnymi dekoracjami, możliwe że wykonywanymi metodą stemplowania. Polegała ona na wycinaniu w miękkim materiale wzoru i po zanurzeniu w farbie odciskaniu na naczyniu. Dodatkowo na niektórych talerzach zastosowana była metoda gąbkowania, w której farba наносzona za pomocą gąbki pozwalała na uzyskanie nieregularnych plam koloru [4].



Rys. 8. Przykład typowej dekoracji roślinnej na talerzu z manufaktury z Lubyczy Królewskiej – centralnej kompozycji kwiatowej i zdobionego obrzeża

Źródło: [materiały własne]

Jednym z najwybitniejszych przykładów fajansów produkowanych w Lubyczy Królewskiej są duże misy (rys. 9), których dekoracja malarska wskazuje na bardzo wysoki poziom umiejętności artystów zatrudnianych przez tę wytwórnię. Widoczne są wpływy motywów rusińskich i zachodnioeuropejskich, ale można zauważyć również inspiracje dekoracjami bliskowschodnimi. Malatura tych naczyń składała się z centralnego elementu inspirowanego

kształtami kwiatów, jednak często zgeometryzowanych lub poddanych dość dowolnej interpretacji twórców. Szczególnie ciekawy jest przykład misy, w której w każdy z sześciu płatków centralnego kwiatu wpisano mniejszą roślinę. Pozostała dekoracja ułożona była w koncentrycznych kręgach rozchodzących się od centralnego elementu kompozycji. Złożona jest ona z różnokolorowych linii o odmiennych grubościach, przeplatanych pasami drobnych elementów wykonywanych za pomocą stempli. Często w dekoracjach ścianek mis stosowano pola zdobione motywami roślin, ich zgeometryzowanymi interpretacjami lub też siatką linii wykonywanych pociągnięciami bardzo cienkiego pędzla.



Rys. 9. Misa z manufaktury w Lubyczy Królewskiej, widoczne bardzo szczegółowe zdobienia roślinne i dekoracje nawiązujące do zdobień bliskowschodnich

Źródło: [materiały własne]

Innym bardzo charakterystycznym wyrobem powstającym w Lubyczy Królewskiej były niewielkie naczynia w kształcie zwierząt lub też ich figurki, mogące pełnić funkcję zabawek dziecięcych [5]. Z uwagi na znaczenie wyobrażeń zoomorficznych w żydowskiej twórczości artystycznej sądzi się, że mogły pełnić one również funkcję amuletów czy „strażników” obejścia domowego i być włączane do zestawu świeczników chanukowych. Charakteryzują

się masowością, dając czasem wrażenie toporności. Wśród tego rodzaju rzeźby małoformatowej wyróżnić możemy dwie kategorie: pudełka w postaci zwierząt, składające się z korpusu głównego i przykrywki, oraz figurki zwierząt. Pierwszy rodzaj wyrobów związany był z modą panującą od lat 40. XIX wieku na terenach dzisiejszej Ukrainy, Rosji i innych krajów słowiańskich. Druga natomiast wykazuje podobieństwo do tradycyjnych ludowych zabawek glinianych, często występujących na terenach dzisiejszej Ukrainy. Cechą łączącą wszystkie rodzaje rzeźb z Lubyczy Królewskiej jest sposób ich dekoracji. Wiele figur malowano tylko dwoma kolorami: białym i czarnym, bez zastosowania dodatkowych płam koloru. W nielicznych przypadkach sięgano po ciepłe odcienie ochry lub też połączenia kolorów różowego, zielonego, niebieskiego, fioletowego czy pomarańczowego. Wszystkie te barwy były jednak stonowane, wręcz pastelowe, i harmonijnie ze sobą się łączyły [1].

5. HISTORIA I WYROBY FABRYK W SIEDLISKACH ORAZ W POTYLICZU

Wytwórnice fajansu w Siedliskach i w Potyliczu powstały przed wytwórniami lubycką. Niestety historia tych dwóch fabryk jest mało poznana i trudna do odtworzenia, a eksponaty, dzięki którym można by odkryć tajemnice tych miejsc, są nieliczne. Zakład w Potyliczu powstał na początku XIX wieku, prawdopodobnie w latach 30., choć konkretna data nie jest znana, a samo powstanie związane jest z osobą Ludgardy Tyszkiewicz Jabłonowskiej. Jest wysoce prawdopodobne, że od lat 80. XIX wieku fabryka ta należała do kupców żydowskich, o czym mają świadczyć zachowane naczynia z napisami hebrajskimi [4]. W „Dzienniku Literackim” z 1867 roku opisano, że w tym czasie zatrudnienie znajdowało w Potyliczu 49 osób, a sama fabryka przerabiała rocznie 250 korców (32 000 litrów) gliny.

Głównym wyrobem zakładu były naczynia stołowe. We wcześniejszym okresie funkcjonowania wytwórni produkowano talerze z ozdobnymi ażurowymi brzegami w kształcie łuków. Dodatkowo wyroby posiadały malunki kwiatów. Zdarzało się, że naczynia były dekorowane też odciskaną dekoracją. W drugiej połowie XIX wieku były malowane na sposób ludowy, podobnie jak produkty w wytwarzane w Lubyczy Królewskiej [5].

Fajanse wytwarzane na potrzeby mieszkańców wsi w obu tych fabrykach często zdobiono motywami roślinnymi lub ptasimi, malowanymi szerokimi, zamasytymi pociągnięciami pędzla [12]. Motywy kwiatowe, którymi dekorowano grubościennie potylickie misy, przypominały uproszczone wersje zdobień występujących na porcelanie. Zwykle był to bukiet, rzadziej rozeta będąca w centralnej części naczynia, otoczona na ściankach drobnymi kwiatuśkami. Używane barwy to najczęściej ceglasteróżowa, zielona i kobaltowa. Innym rodzajem wyrobów były gładkie misy, na których ozdoba w kolorze brązowym lub błękitnym występowała tylko przy brzegu w postaci cienkiego paska [4]. Wyprodukowane we wsi Potylicz talerze ukształtowane były w idealny krąg lub owal, a ich spody wymodelowane były na płasko, bez wyraźnie zaznaczonej podstawy [12]. Wytwórnica została zamknięta pod koniec XIX wieku.

Okoliczną ludność w nie za wysokiej jakości fajans zaopatrywała też fabryka w Siedliskach. Data jej powstania również nie jest znana. Łączy się ją z Józefem Jabłonowskim i w niektórych źródłach szacuje się na połowę XIX wieku [5]. Budzi to jednak wątpliwości, ponieważ

pierwsze wzmianki o fabryce pochodzą z 1818 roku [2]. Natomiast kolejne pojawiają się w niemieckojęzycznej książce Wenzla Carla Wolfganga Blumenbacha, „Neuestes Gemälde der Oesterreichischen Monarchie” z 1833 roku: „Także Siedliska, dobra koło Rawy, posiadają fabrykę fajansów, która dostarcza piękne i dobre produkty” (za: [2, s. 160]). Zachowało się kilka naczyń o żółtawym szkliwie, ze skromną dekoracją roślinną oraz nieco talerzy zdobionych za pomocą stempelka lub z dekoracją wytłaczaną [5]. W austriackich materiałach statycznych „Mittheilungen aus dem Gebiet der Statistik” z 1857 roku wspomniano, że w wytwórni w Siedliskach znajdował się jeden piec, a w Potyliczu dwa piece. W 1866 roku Antoni Schneider, autor „Encyklopedji do krajoznawstwa Galicyi”, w swoim opisie zakładu produkcyjnego wspomina o 27 zatrudnionych robotnikach, przewodniku i dozorczy. Informuje o tym, że w Siedliskach przerabia się 300 korców gliny, która tak samo jak glina używana w Potyliczu sprowadzana jest z Kamionki Wołoskiej i Olejowa (za: [2]). Manufaktura produkowała przede wszystkim naczynia stołowe, a to nie jedyna cecha wspólna omawianych fabryk. We wszystkich trzech manufakturach – w Potyliczu, Siedliskach i Lubyczy Królewskiej – powstawały wyroby inspirowane kulturą ludową: malowane były zazwyczaj w proste kompozycje kwiatowe (rys. 10, rys. 11), śmiałymi i zamaszystymi pociągnięciami pędzla. W dekoracjach była zauważalna inspiracja naturą. Produkty z Siedlisk, tak jak w Potyliczu, były zdobione wokół brzegu zieloną winną girlandą [12].



Rys. 10. Talerz z manufaktury w Siedliskach zdobiony prostymi ornamentami roślinnymi na brzegu

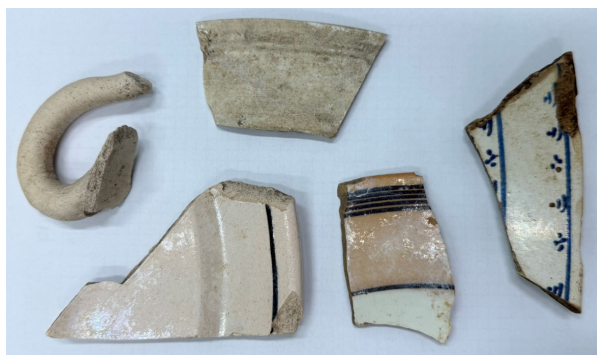
Źródło: [materiały własne]



Rys. 11. Kubeczki z manufaktury w Siedliskach:
jeden zdobiony prostymi poziomymi liniami, drugi skromną dekoracją roślinną

Źródło: [materiały własne]

W kolejnych latach liczba pracowników w fajansiarni w Siedliskach spadała. W 1869 roku wynosiła już 17 pracowników, w tym samym czasie w Potyliczu zatrudnionych było osób 15 [2]. O kłopotach fabryk w Siedliskach, Potyliczu czy Lubyczy Królewskiej istnieją wzmianki już w roku 1878, według których przyczyną miało być nieodpowiednie kierownictwo. Ostatnia wiarygodna informacja o zakładzie w Siedliskach pochodzi z 1883 roku [2]. Obecnie jedyną pozostałością po wytwórni fajansu są zasypane ziemią potłuczone wyroby oraz resztki ceglanych fundamentów fabryki (rys. 12).



Rys. 12. Fragmenty ceramiki odnalezione w Siedliskach podczas badań terenowych w 2024 roku,
część z zachowaną dekoracją malarską i szkliwem

Źródło: [materiały własne]

6. PODSUMOWANIE

Fabryki fajansu działające w XIX wieku na terenach położonych na obecnym pograniczu Polski i Ukrainy w czasach swojej świetności stanowiły niezwykle ważny element gospodarki galicyjskiej i lokalnego przemysłu. Zachowane informacje i wyroby są świadectwem ludowych tradycji lokalnej społeczności. Ukazują niezwykle przeplatanie się wzorów i motywów, pochodzących z wielu kultur, które koegzystowały ze sobą przez wieki.

Szczególnie warte uwagi są wyroby ceramiczne wykorzystywane przez ludność żydowską podczas obrzędów religijnych, takie jak na przykład pojemniki na macę, które nie posiadają żadnych znanych w innych kulturach odpowiedników. Ważne są także misy, talerze czy dzbany, w których motywy roślinne, zaczerpnięte z kultury rusińskiej i wzbogacone kreatywnością samych twórców, tworzą niepowtarzalne kompozycje. Pomimo ograniczonej palety barw, wymuszonej przez dostępne wówczas zasoby mineralne, naczynia – nawet po upływie ponad stu lat – wciąż zachwycają swoją żywą kolorystyką, budząc podziw u każdego oglądającego. Unikatowość wyrobów z manufaktur wymienionych w artykule wynika nie tylko z ich wartości jako świadectwa ówczesnej kultury, ale także z ich rzadkości – zachowało się ich bardzo niewiele, a te nieliczne cieszą się zainteresowaniem na aukcjach.

Zakłady fajansowe w Potyliczu, Siedliskach i Lubyczy Królewskiej łączy wiele – nie tylko podobieństwo wyrobów, lecz także wspólna lokalizacja i historia. Niestety ta ostatnia pozostaje w dużej mierze nieodkryta, a przez to również niezbadana, a samo istnienie tych wytwórni jest często pomijane i zapomniane. To temat, który wymaga zgłębienia i podjęcia badań, ale jest to praca dla specjalistów – ceramików mających odpowiednie doświadczenie oraz wiedzę, która pozwoli im te tajemnice odkryć.

LITERATURA

- [1] Szkolna O., *Farfor – fajans Ukrainy. Istorija wyrobnictw. Rejestr imen prowidnych majstriw haluzi*, Deń peczaty, Kyjiw 2013 [Школьна О., *Фарфор – фаянс України. Історія виробництва. Реєстр імен провідних майстрів галузі*, День печати, Київ 2013], s. 137–145.
- [2] Pizun Z., Gawryś R., *Fabryki ceramiki w Lubyczy Królewskiej i Siedliskach Tomaszowskich*, Rocznik Tomaszowski, t. 7, 2018, s. 21–44.
- [3] Pizun Z., Gawryś R., *Właściciele ziemscy w miasteczku Lubycza Królewska (1787–1939)*, Rocznik Tomaszowski, t. 6, 2017, s. 19–41.
- [4] Grzędziela R., *Fajanse polskie od połowy XIX do połowy XX w.*, Krajowa Agencja Wydawnicza, Rzeszów 1983, s. 7–10, 26, 60–61, 74.
- [5] Starzewska M., Jeżowska M., *Polski fajans*, Zakład Narodowy im. Ossolińskich, Wrocław 1978, s. 44–46, 60–61, 75–76.
- [6] Łopaciński H., *Fabryki ceramiczne w Tomaszowie i Lubartowie dziś nie istniejące. Kilka wiadomości do dziejów przemysłu artystycznego w Polsce*, Sprawozdania Komisji Historii Sztuki VIII, Kraków 1907, s. 10.
- [7] Pawlewski B., *Przemysł ceramiczny w Galicyi*, Chemik Polski: czasopismo poświęcone wszystkim gałęziom chemii teoretycznej i stosowanej, R. 7, nr 4, 1907, s. 87–89.

- [8] Goldstein M., Dresdner K., *Kultura i sztuka ludu żydowskiego na ziemiach polskich*. Maksymilian Goldstein (Drukarnia Polska), Lwów 1935, s. 83–86.
- [9] Muzeum i Miejsce Pamięci w Bełżcu, *Lubycza Królewska*, https://www.belzec.eu/media/files/pages/314/lubycza_krolewska.pdf [dostęp: 15.02.2025].
- [10] Grzebalska M., Kalwińska E., *Pascha – obrzędy i obyczaje na Lubelszczyźnie*, <https://teatrnn.pl/leksykon/artykuly/pascha-obrzedy-i-obyczaje-na-lubelszczyznie/> [dostęp: 4.02.2025].
- [11] Sieramska M., *Polski słownik judaistyczny*, <https://delet.jhi.pl/pl/psj?articleId=14095> [dostęp: 9.02.2024].
- [12] Chojnacka H., *Fajanse polskie XVIII–XIX wieku*, Krajowa Agencja Wydawnicza, Warszawa 1981, s. 47–48, 51–58, 65–84.

Patryk Darlak*

UWZGLĘDNIENIE PANELI FOTOWOLTAICZNYCH W PROCESIE PROJEKTOWANIA STAŁOWYCH HAL PRZEMYSŁOWYCH

W artykule przedstawiono proces projektowania konstrukcyjnego szkieletu nośnego hali stalowej, która została wyposażona w instalację fotowoltaiczną z panelami dachowymi. Przyjęcie takiego rozwiązania technicznego skutkuje koniecznością wprowadzenia pewnych korekt i uzupełnień w standardowym procesie projektowania obiektu budowlanego, nie tylko na etapie koncepcji architektonicznej, lecz również w konstrukcyjnym modelu obliczeniowym, zwłaszcza modelu obciążeń klimatycznych, jak również w zakresie funkcjonalności techniczno-użytkowej obiektu. Zagadnienia te zostały przedstawione z wykorzystaniem przykładu stalowej jednonawowej hali parterowej.

INTEGRATION OF PHOTOVOLTAIC PANELS IN THE DESIGN PROCESS OF STEEL INDUSTRIAL HALLS

This paper presents the structural design process for the load-bearing frame of a steel hall fitted with a photovoltaic system with roof panels. The application of such a technical solution results in the need for certain corrections and additions to the standard design process of a building, not only at the stage of the architectural concept, but also in the field of the structural calculation model, especially the climatic load model, as well as in the domain of the technical-utility functionality of the building. These issues are presented using the example of a steel single-bay single-storey hall.

1. WSTĘP

Sprostanie współczesnym wyzwaniom związanym z troską o stan środowiska, zmianami klimatycznymi oraz rosnącymi kosztami energii wymaga zwiększenia wykorzystania odnawialnych źródeł energii przy jednoczesnym ograniczaniu pozyskiwania energii z wysokoemisyjnych paliw kopalnych. Jednym z głównych nurtów zielonej transformacji jest

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

wykorzystanie energii słonecznej. Korzyści z tego płynące są szczególnie duże w przypadku zasilania tą energią budynków przemysłowych, są to m.in.: redukcja kosztów zużywanej energii elektrycznej, możliwość uzyskania autonomii energetycznej dla urządzeń wymagających ciągłego zasilania, a także możliwość skorzystania z dotacji i ulg podatkowych obniżających koszt instalacji. Integracja paneli fotowoltaicznych z nowo projektowanymi oraz istniejącymi obiektami budowlanymi staje się coraz powszechniejszą praktyką, co stanowi ważny element w dążeniu do osiągnięcia zrównoważonego rozwoju.

Zaprojektowany obiekt to jednonawowa hala przemysłowa o przeznaczeniu produkcyjno-magazynowym, w którym zaplanowano montaż paneli fotowoltaicznych na połaci dachowej. Dach ma symetryczny dwuspadowy układ połaci o kącie pochylenia 5° . Ze względu na przewidywany poziom zużycia energii elektrycznej oraz korzystne usytuowanie połaci względem stron świata zdecydowano o umieszczeniu paneli tylko na połaci południowej. Istotnym elementem projektu był wybór takiego układu konstrukcyjnego hali, który pozostawałby w zgodzie z celami przyjętymi podczas podejmowania decyzji o zastosowaniu instalacji fotowoltaicznej w budynku, tj. redukcją kosztów inwestycji oraz emisji CO_2 .

Podstawowy układem nośnym hali są stalowe ramy płaskie wykonane z blachownic dwuteowych o zmiennej wysokości przekroju. Tego rodzaju konstrukcja charakteryzuje się dużą nośnością przy jednoczesnym niewielkim zużyciu materiału, co pozwala na osiągnięcie optymalnej równowagi pomiędzy bezpieczeństwem konstrukcji, kosztami inwestycji oraz funkcjonalnością obiektu, mimo że dachowe panele fotowoltaiczne generują dodatkowe obciążenie grawitacyjne dachu oraz wpływają na zwiększenie wartości oddziaływań klimatycznych, takich jak obciążenia śniegiem czy wiatrem. W płatwiowej konstrukcji dachu zastosowano elementy w formie belek wieloprzęsłowych z lekkich stalowych profili giętych na zimno. W procedurze projektowej uwzględniono również wymiarowanie kratowych stężeń połaciowych i ściennych mających na celu zapewnienie stateczności szkieletu nośnego hali.

Uzupełnieniem części artykułu dotyczącej kształtowania konstrukcji są wizualizacje zaprojektowanego obiektu wykonane przy użyciu oprogramowania *Autodesk Revit* połączonego z silnikiem renderującym *Chaos V-Ray*.

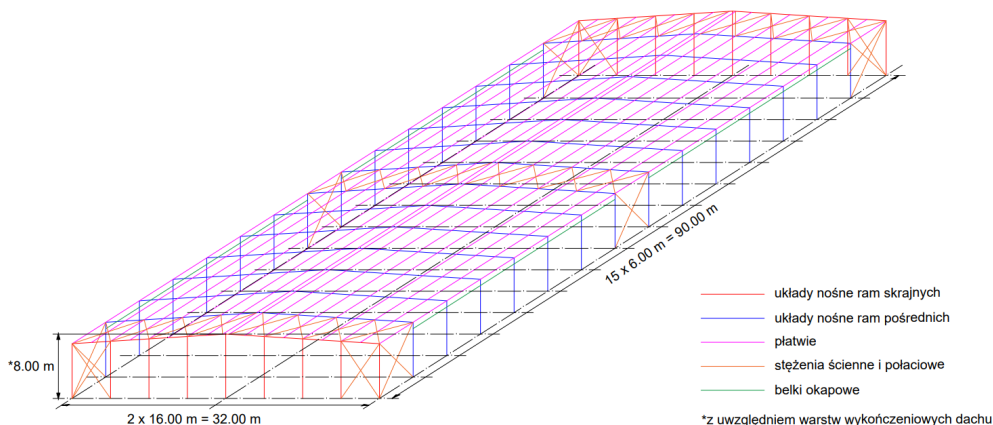
2. CHARAKTERYSTYKA PROJEKTOWANEGO BUDYNKU

2.1. GEOMETRIA UKŁADU NOŚNEGO

Projekt hali stalowej ukształtowano na siatce modularnej, o 6,00-metrowym module podłużnym oraz 16,00-metrowym module poprzecznym. Charakterystyczne wymiary rzutu hali w osiach systemowych wynoszą 32,00 m na 90,00 m z kalenicą usytuowaną na rzędnej +8,00 m.

Podstawowym elementem ustroju nośnego hali były dwuprzegubowe ramy płaskie o rozpiętości 32,00 m, symetryczne względem osi kalenicy. Rygiel ram został załamany w kalenicy, kształtując spadek połaci dachowych o kącie pochylenia 5° . Rygle ścian szczytowych podparte zostały słupami pośrednimi o rozstawie osiowym 4,00 m. Stateczność konstrukcji w kierunku podłużnym zapewniły układy stężeń poprzecznych połaciowych i współpracujących z nimi stężeń pionowych międzysłupowych. Płatwie dachowe zostały rozstawione

równomiernie na połaci dachowej co 2,00 m, przy czym w polach przykalenicowych rozstaw ten wyniósł 1,80 m. Na rysunku 1 przedstawiono ustrój nośny hali, wyróżniając barwnie podukłady konstrukcyjne.



Rys. 1. Izometria głównego układu nośnego hali

2.2. LOKALIZACJA OBIEKTU

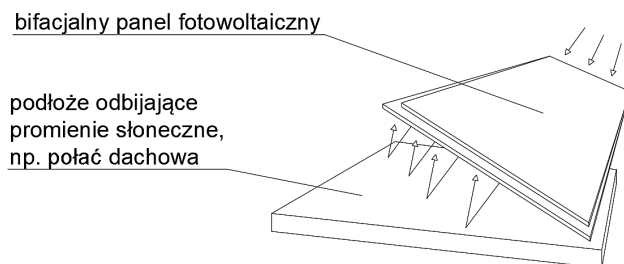
Budynek został zaprojektowany na terenie działki usytuowanej w Krakowie. Średnia rzędna wysokościowa wybranej działki wyniosła około 237,00 m n.p.m.

Oś podłużna budynku została zorientowana wzdłuż linii W–E, przez co połacie dwuspadowego dachu uzyskały odpowiednio północną i południową ekspozycję, co zapewniło korzystne warunki dla montażu instalacji fotowoltaicznej. Zwiększona efektywność pracy paneli rozmieszczonych na połaci południowej umożliwiła rezygnację z montażu dodatkowych modułów na połaci północnej.

3. SYSTEM INSTALACJI FOTOWOLTAICZNEJ

Fotowoltaika to dziedzina nauki i techniki zajmująca się konwersją energii słonecznej na energię elektryczną za pomocą specjalistycznych urządzeń i instalacji. Podstawowym elementem każdej takiej instalacji są panele fotowoltaiczne, znane również jako ogniwa słoneczne, które znajdują szerokie zastosowanie również w innych dziedzinach życia, poczynając od małych urządzeń elektronicznych, a kończąc na dużych instalacjach przemysłowych.

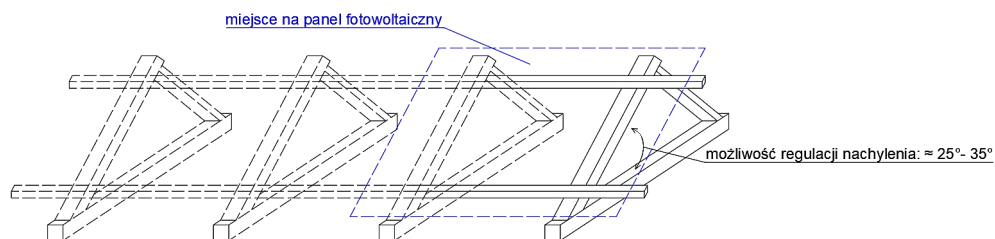
Panele zastosowane w projekcie to ogniwa bifacjalne, czyli moduły o dwustronnej powierzchni aktywnej. Wykorzystują one zarówno bezpośrednie światło słoneczne, jak i światło odbite od otaczających powierzchni (np. ziemi, dachu), które przejmowane jest przez tylną powierzchnię panelu, co zwiększa ich efektywność energetyczną. Panel fotowoltaiczny opisany w tej pracy oraz schemat jego działania przedstawiono na rysunku 2.



Rys. 2. Panel bifacjalny i schemat jego działania

Źródło: opracowanie własne na podstawie [1]

W budynkach przemysłowych najczęściej stosuje się dachy płaskie, tj. takie, których kąt nachylenia względem poziomu nie przekracza 5° [2]. Montaż paneli fotowoltaicznych na dachach tego typu wymaga specjalnych systemów mocowania, które zapewnią odpowiednią orientację kątową paneli umożliwiającą osiągnięcie maksymalnej wydajności energetycznej. Zastosowanie systemu montażowego z regulowaną wysokością umożliwiło optymalne i bezpieczne rozłożenie paneli na połaci południowej. W takim systemie panele montowane są na konstrukcjach wsporczych (tzw. ekierkach – rys. 3), które umożliwiają ustawienie ich pod odpowiednim kątem w celu uzyskania maksymalnego nasłonecznienia i najwyższej efektywności energetycznej.



Rys. 3. System montażowy – tzw. ekierka

Źródło: opracowanie własne na podstawie [3]

Instalacja przyjęta w projekcie jako podstawa do przeprowadzenia obliczeń i analizy, składa się z:

- systemu montażowego kotwionego, tzw. ekierki: *BAKS DP-DTAVKN*;
- bifacjalnych paneli fotowoltaicznych: *Ja Solar 420 JAM54D40 N-Type BIFACIAL MB BF*.

4. PROJEKT KONSTRUKCJI STALOWEJ BUDYNKU

4.1. ZESTAWIENIE OBCIĄŻEŃ

Zamontowanie na dachu paneli fotowoltaicznych sprawia, że zarówno obciążenie wiatrem, jak i śniegiem przyjmuje odmienny układ i wartości w porównaniu z obciążeniem dachów niewyposażonych w takie instalacje. Metodyka wyznaczania obciążeń klimatycznych

dachów z instalacjami fotowoltaicznymi nie została określona w aktualnych wersjach odpowiednich norm przedmiotowych polskiej wersji europejskiej normy do projektowania budynków [4] oraz [2].

Obciążenie śniegiem

Wartość obciążenia dachu spowodowana oddziaływaniem śniegu s zgodnie z pkt 5.2 (wzór 5.1) PN-EN 1991-1-3 [4] wyznaczono ze wzoru (1), przyjmując poniższe założenia:

- strefa 3. obciążenia gruntu śniegiem (Kraków);
- wysokość nad poziomem morza $A = 237,00$ m.

$$s = \mu_i \cdot C_e \cdot C_t \cdot s_k \left[\frac{\text{kN}}{\text{m}^2} \right] \quad (1)$$

gdzie:

- μ_i – współczynnik kształtu dachu, zgodnie z tablicą 5.2 normy [4], $\mu_i = \mu_1 = 0,80$;
- C_e – współczynnik ekspozycji, zgodnie z pkt 5.2 (tablica 5.1) normy [4], $C_e = 100$;
- C_t – współczynnik termiczny, zgodnie z pkt 5.2 (8) normy [4], $C_t = 1,00$;
- s_k – wartość charakterystyczna obciążenia gruntu śniegiem, zgodnie z normą [4] – załącznik krajowy NB, $s_k = 1,20$ kN/m².

Wartość obciążenia dachu wywołana oddziaływaniem śniegu wyniosła:

$$s = 0,80 \cdot 1,00 \cdot 1,00 \cdot 1,20 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2} = 0,96 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}.$$

W przypadku montażu instalacji fotowoltaicznych na dachach płaskich istnieje ryzyko gromadzenia się śniegu pod konstrukcją wsporczą paneli i pomiędzy rzędami modułów. Powoduje to powstanie obciążeń przekraczających wartości przewidziane w PN-EN 1991-1-3 [4]. Przyczyną tego zjawiska jest zsuwanie się śniegu z paneli, które są nachylone pod kątem większym niż połać dachowa, oraz praktycznie bardzo ograniczona możliwość przemieszczania śniegu przez wiatr, co pokazano na rysunku 4.



Rys. 4. Zjawisko tworzenia się zasp śnieżnych w sąsiedztwie paneli

Źródło: [5]

Eurokod [4], w aktualnie obowiązującej wersji, nie definiuje sposobu uwzględnienia zwiększonej wartości obciążenia, wynikającej z przedstawionego na rysunku 4 zjawiska. W związku z tym obciążenie śniegiem zostało obliczone według nowych regulacji przedstawionych w załączniku krajowym normy DIN-EN 1991-1-3/NA:2019 [6]. Zgodnie z tymi wytycznymi obciążenie śniegiem (1) wyznacza się, przyjmując wartość współczynnika kształtu dachu w obszarze montażu paneli według rysunku 5. Wartość wspomnianego współczynnika określa się na podstawie wzorów:

$$\mu_s = \min \left(1,00; \gamma \cdot \frac{h}{s_k} \right), \text{ dla } h \leq 0,50 \text{ m} \quad (2)$$

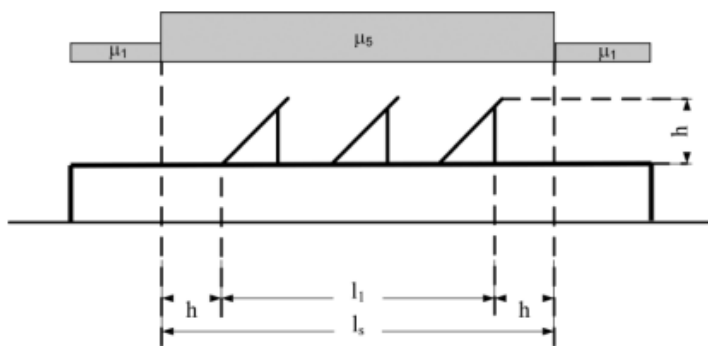
$$\mu_s = 1,10, \text{ dla } h > 0,50 \text{ m} \quad (3)$$

gdzie:

γ – ekwiwalentny ciężar objętościowy śniegu, zalecana wartość podana w [6],
 $\gamma = 2,00 \text{ kN/m}^3$;

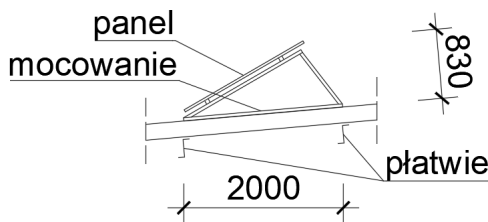
h – wysokość paneli fotowoltaicznych, wartość mierzona prostopadłe do połaci dachowej, zgodnie z rysunkiem 6, $h = 0,83 \text{ m}$;

s_k – jak we wzorze (1), $s_k = 1,20 \text{ kN/m}^2$.



Rys. 5. Rozkład współczynników kształtu dachu μ_1 oraz μ_s

Źródło: [6]



Rys. 6. Geometria pojedynczego modułu systemowego instalacji

W przypadku dobranego systemu instalacji fotowoltaicznych ($h = 0,83 \text{ m} > 0,50 \text{ m}$) wartość współczynnika kształtu dachu wyniosła $\mu_s = 1,10$.

Podstawiając wartość μ_s otrzymaną ze wzoru (3) za wartość μ_i we wzorze (1), otrzymano wartość obciążenia dachu równą $1,32 \text{ kN/m}^2$, co stanowi wartość niemal o 38% większą od wartości obciążenia wyznaczonego zgodnie z polską wersją normy [4] dla dachu bez paneli fotowoltaicznych. Do dalszych obliczeń przyjęto lokalnie zwiększoną wartość oddziaływania śniegiem, tj. $1,32 \text{ kN/m}^2$.

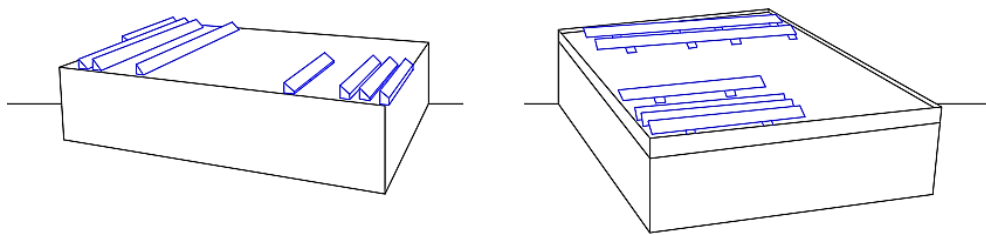
Obciążenie wiatrem

Oddziaływanie wiatru na połac dachową z panelami fotowoltaicznymi nie jest ujęte w przepisach normy PN-EN 1991-1-4 [2], w związku z czym obliczenia prowadzi się tak jak w przypadku połaci niewyposażonej w tego typu instalacje.

Problem wyznaczania obciążeń spowodowanych oddziaływaniem wiatru w sytuacji zbliżonej do warunków rzeczywistych instalacji paneli fotowoltaicznych udało się rozwiązać dzięki badaniom przeprowadzonym przez Holenderską Organizację Zastosowań Nauki (TNO) [7]. Autorzy przedstawili wartości współczynnika ciśnienia wiatru $c_{p,net}$ oraz $c_{pe,1}$, które są niezbędne do obliczenia obciążenia powierzchniowego dachu. Współczynniki te zostały wyznaczone na podstawie symulacji obciążenia wiatrem modelu budynku z panelami fotowoltaicznymi na dachu (rys. 7) w tunelu aerodynamicznym.

Model wykonano w dwóch wariantach:

- 1) budynek bez attyki oraz z systemem instalacji fotowoltaicznej zabudowanej w sposób uniemożliwiający przepływ wiatru pod panelami,
- 2) budynek z attyką oraz z systemem instalacji fotowoltaicznej umożliwiającym przepływ wiatru pod panelami.

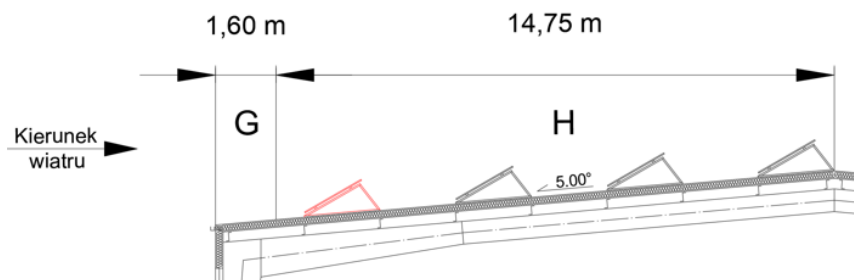


Rys. 7. Modele badawcze budynku z panelami fotowoltaicznymi

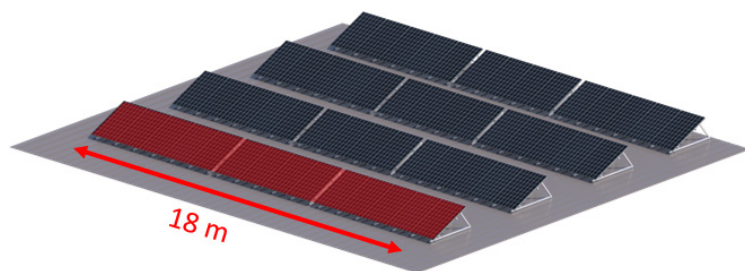
Źródło: opracowanie własne na podstawie [7]

Analizę porównawczą wyników otrzymanych zgodnie z normą PN-EN 1991-1-4 [2] oraz wyników doświadczalnych przeprowadzono, przyjmując następujące założenia:

- kierunek wiatru jest prostopadły do dłuższej ściany budynku;
- obliczenia przeprowadzono dla połaci dachu w polu H – zgodnie z oznaczeniami normy [2], ponieważ pierwszy rząd paneli znajduje się w tej właśnie strefie (rys. 8);
- obciążenie wiatrem dachu obliczono w miejscu występowania pierwszego rzędu paneli (rys. 9).



Rys. 8. Przekrój przez dach budynku oraz podział na strefy obciążenia wiatrowego



Rys. 9. Fragment połaci dachu z wyszczególnionymi panelami poddanymi analizie

Wartość obciążenia powierzchni w_{pe} spowodowanego oddziaływaniem wiatru wyraża się równaniem:

$$w_{pe} = c_{pe,i} \cdot q_p \left[\frac{\text{kN}}{\text{m}^2} \right] \quad (4)$$

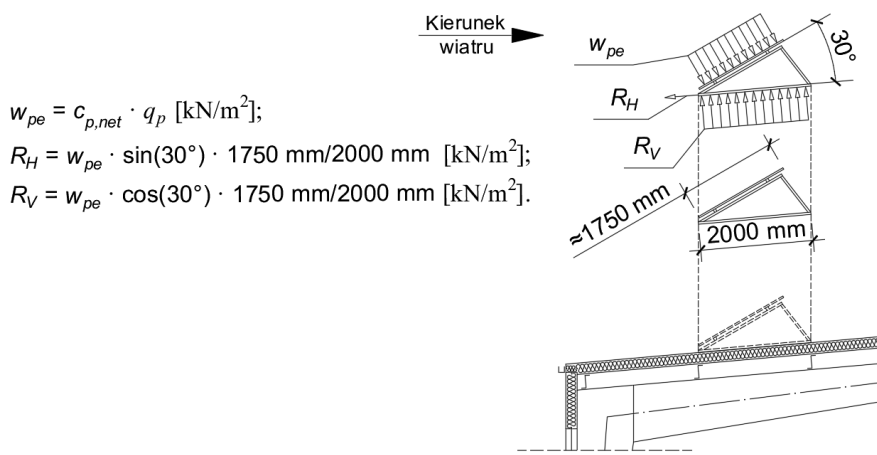
gdzie:

$c_{pe,i}$ – współczynnik ciśnienia dachu, przyjmowany w zależności od wybranego sposobu obliczeń:

- wg normy [2]: $c_{pe,i} = c_{pe,1}$ lub $c_{pe,10}$;
- wg metody eksperymentalnej [7]: $c_{pe,i} = c_{p,net}$;

q_p – szczytowe ciśnienie prędkości wiatru obliczane wg normy [2] niezależnie od wybranego sposobu analizy; przy założonych warunkach projektowych $q_p = 0,54 \text{ kN/m}^2$.

Różnica pomiędzy podejściem przedstawionym w Eurokodzie 1 [2] a metodą zaprezentowaną w badaniach [7] polega na tym, że w przypadku normy obciążenie w_{pe} jest wartością podawaną dla płaszczyzny połaci, natomiast w drugim przypadku odnosi się do płaszczyzny panelu fotowoltaicznego. Aby umożliwić poprawne porównanie tych wartości, obciążenie z paneli fotowoltaicznych zostało zrzucone prostopadle do płaszczyzny połaci dachowej hali, zgodnie z rysunkiem 10.



Rys. 10. Geometria modelu obliczeniowego oraz rozkład obciążenia w_{pe}

Podstawiając odpowiednie wartości współczynników $c_{pe,i}$ do wzoru (4), otrzymano wartości obciążenia odpowiadające powierzchni połaci lub paneli w_{pe} , które następnie podstawiono do wzorów przedstawionych na rysunku 10. Na tej podstawie obliczono wartości sił działających na połac w miejscu występowania systemu paneli fotowoltaicznych. Wyniki dla każdej z metod przedstawiono w tabeli 1.

Tabela 1. Wartości obciążenia połaci dachowej w zależności od sposobu obliczeń

Sposób obliczeń	Według obowiązującej normy	Według badań NTO
Współczynnik ciśnienia wiatru $c_{pe,i}$ [–]	min: –0,60/max: +0,00	min: –1,20/max: +0,20
Obciążenie powierzchni w_{pe} [kN/m ²]	min: –0,33/max: 0,00	min: –0,65/max: +0,11
Obciążenie prostopadłe do połaci [kN/m ²]	min: –0,33/max: 0,00	min: –0,49/max: +0,08

Źródło: opracowanie własne na podstawie [2, 7]

Podsumowując, obciążenie dachu w strefie H z uwzględnieniem paneli fotowoltaicznych dla przyjętych założeń okazało się o 48% większe. Świadczy to o tym, jak duże znaczenie ma uwzględnianie paneli fotowoltaicznych zamontowanych na dachu przy modelowaniu obciążeń statycznych, mimo braku jednoznacznych wytycznych w obowiązujących normach projektowych.

W dalszych obliczeniach stosowano jednak podejście przedstawione w Eurokodzie 1, a wyniki otrzymane na podstawie artykułu [7] potraktowano jako punkt odniesienia do porównania z wartościami uzyskanymi zgodnie z normą [2].

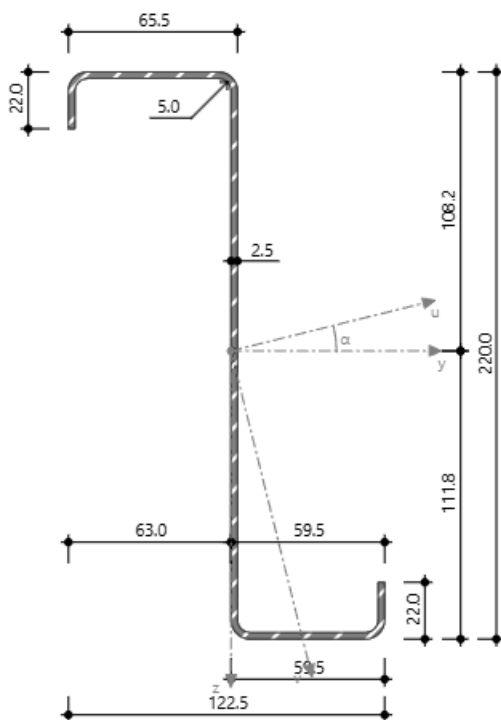
4.2. WYMIAROWANIE ELEMENTÓW KONSTRUKCYJNYCH

Konstrukcja budynku została zaprojektowana zgodnie z aktualnie obowiązującymi normami projektowania konstrukcji stalowych, tj.:

- PN-EN 1993-1-1:2006 [8],
- PN-EN 1993-1-3:2008 [9],
- PN-EN 1993-1-5:2008 [10],
- PN-EN 1993-1-8:2006 [11].

Platwę

W kształtowaniu konstrukcji dachu zastosowano płatwie z kształtownika profilowanego na zimno. Profile tego typu mają masę znacznie mniejszą niż ich odpowiedniki pod względem nośności przekrojowej wykonane przy wykorzystaniu technologii walcowania na gorąco. Powoduje to, że konstrukcja jest tańsza, a ponadto generowane są mniejsze wartości sił przekrojowych. Przekrój płatwi dobrano w postaci zetownika czterogiętego o wysokości 220,00 mm i grubości ścianek 2,50 mm, wykonanego ze stali S350GD+Z (rys. 11). Maksymalne wykorzystanie przyjętego kształtownika pod względem nośności oszacowano na 85%.

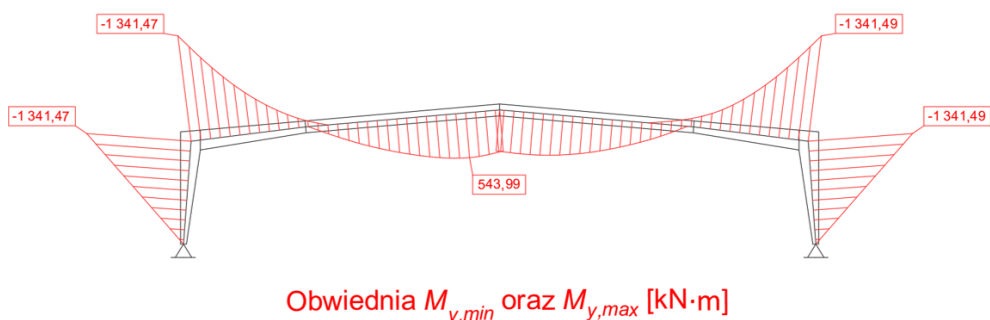


Rys. 11. Przekrój płatwi z oznaczeniem głównych centralnych osi bezwładności

Źródło: opracowanie własne na podstawie [12]

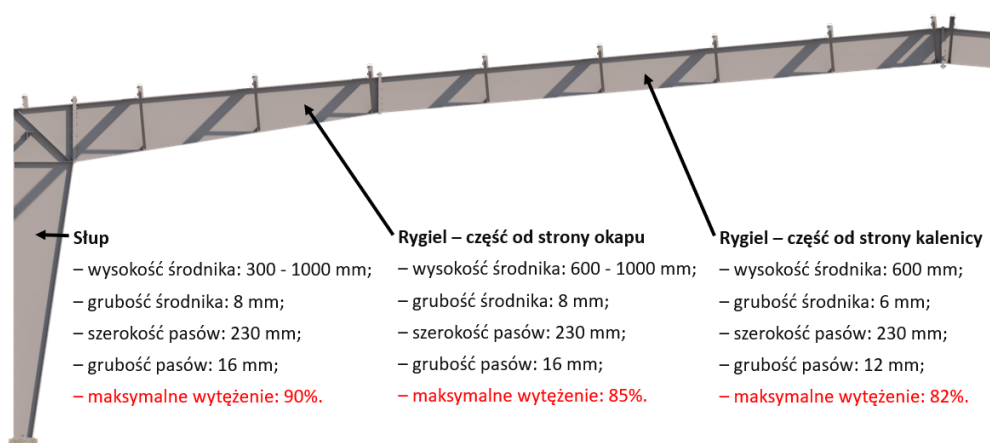
Rama pośrednia

Rama pośrednia to stalowa jednonawowa rama portalowa, która składa się z rygla podzielonego na dwa elementy wysyłkowe oraz dwóch słupów. Rygiel w swej części środkowej został zaprojektowany z profilu blachownicowego o stałej wysokości przekroju. Części rygla przyległe do słupów oraz same słupy zaprojektowano z blachownic o liniowo zmiennej wysokości przekroju. Wszystkie elementy ramy zostały zaprojektowane z niskostopowej stali S355. Układ konstrukcyjny ukształtowano stosownie do przebiegu obwiedni momentów zginających ramę (M_y), co pokazano na rysunku 12.



Rys. 12. Obwiednia momentów zginających M_y ramy pośredniej [kN·m]

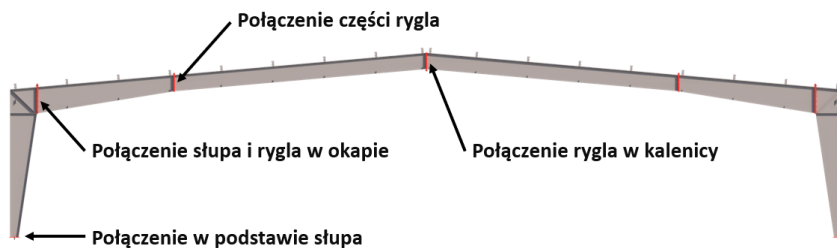
Wysokość przekroju została dostosowana do wartości sił wewnętrznych, co pozwoliło ograniczyć zużycie stali i obniżyć koszty inwestycji. Dokładny kształt ramy pośredniej wraz z procentowym wykorzystaniem nośności elementów przedstawiono na rysunku 13.



Rys. 13. Geometria oraz stopnie wykorzystania nośności elementów ramy pośredniej

Połączenia

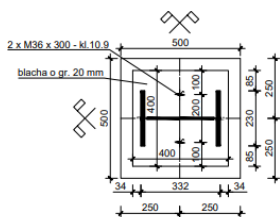
Konstrukcja ramy została zaprojektowana przy założeniu stosowania śrubowych doczołowych połączeń montażowych pomiędzy elementami wysyłkowymi (rys. 14).



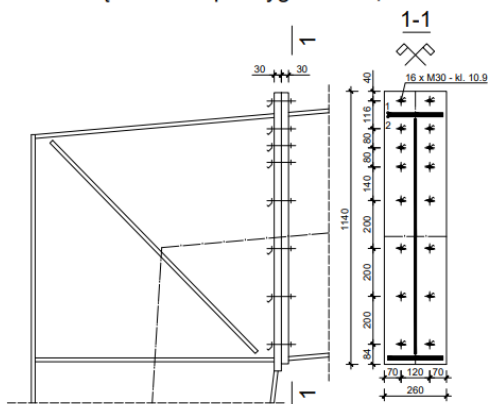
Rys. 14. Rodzaje i lokalizacja połączeń montażowych

Sposób ukształtowania połączeń przedstawiono na rysunku 15.

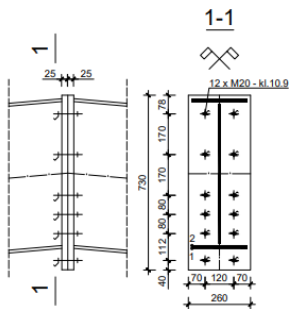
Połączenie w podstawie słupa



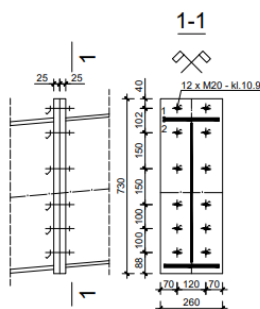
Połączenie słupa i rygła w okapie



Połączenie części rygła



Połączenie rygła w kalenicy



Rys. 15. Geometria połączeń montażowych ramy pośredniej

W tabeli 2 zestawiono dane dotyczące każdego z połączeń, uwzględniając maksymalne wyężenia.

Tabela 2. Szczegóły dotyczące zaprojektowanych połączeń montażowych

Lokalizacja połączenia	Podstawa słupa	Okap	Styk rygła	Kalenica
Rodzaj połączenia	doczołowe, niesprężane, kat. D	doczołowe, sprężane, kat. E	doczołowe, sprężane, kat. E	doczołowe, sprężane, kat. E
Maksymalne wyężenie [%]	76	90	67	87

Stężenia

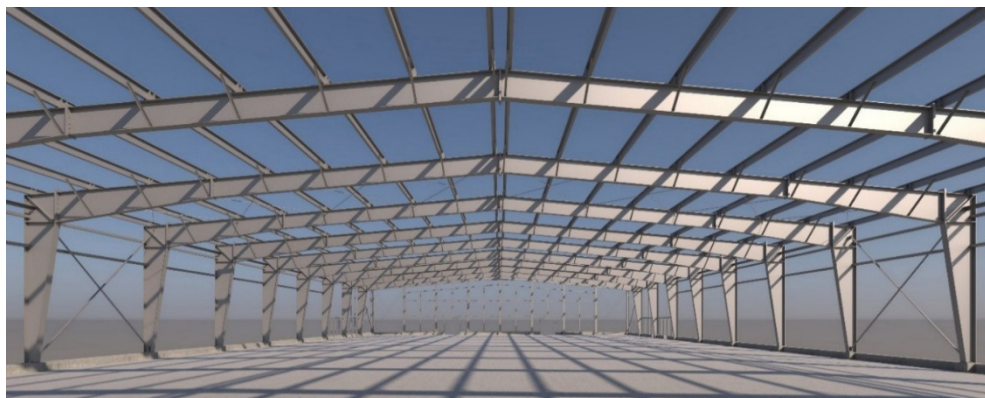
Stateczność obiektu w kierunku podłużnym zabezpieczono, stosując stężenia połaciowe poprzeczne oraz pionowe międzysłupowe typu kratowego ze stali gatunku S355. Zaprojektowano następujące kształtowniki:

- w stężeniach połaciowych poprzecznych pręt pełny okrągły o średnicy 20,0 mm ze wstępnym naciągami uzyskiwanym za pomocą tzw. śruby rzymskiej – stopień wykorzystania nośności elementu ok. 72%;
- w pionowych stężeniach międzysłupowych kątownik L70x70x6 – stopień wykorzystania nośności elementu ok. 84%.

Dodatkowym podukładem stężającym były zastrzały płatwi, które zabezpieczały odpowiednie przekroje rygła przed obrotem i przemieszczeniem bocznym.

Szkielet konstrukcyjny obiektu

Wizualizację szkieletu konstrukcyjnego hali, ukształtowanego na podstawie informacji i danych z poprzednich podrozdziałów, przedstawiono na rysunku 16.



Rys. 16. Wizualizacja stalowego szkieletu hali

5. ARCHITEKTURA OBIEKTU

Projekt konstrukcyjny uzupełniono, opracowując podstawowe elementy architektury budynku. Uwzględniono przy tym takie aspekty, jak funkcja, forma, wygląd i zagospodarowanie najbliższego otoczenia obiektu. Pod względem funkcjonalnym budynek podzielono na dwie części. Pierwsza z nich składa się z dwóch segmentów hali o łącznych wymiarach w rzucie $32,00\text{ m} \times 12,00\text{ m}$ i przeznaczona została na strefę administracyjno-socjalną. Druga część, o wymiarach rzutu $32,00\text{ m} \times 76,00\text{ m}$, była wykorzystana na cele produkcyjno-magazynowe. Łączna powierzchnia użytkowa tej części wyniosła blisko $2500,00\text{ m}^2$.

Wygląd elewacji obiektu wraz z wnętrzem części produkcyjno-magazynowej przedstawiono na rysunkach 17–19.



Rys. 17. Zewnętrzna część budynku od strony frontowej



Rys. 18. Zewnętrzna część budynku od strony placu załadunkowego



Rys. 19. Wnętrze budynku – część produkcyjno-magazynowa

6. PODSUMOWANIE

Powszechnie stosowane obecnie instalacje fotowoltaiczne montowane na dachach stalowych hal przemysłowych są źródłem dodatkowych obciążeń. Wynikają one z ciężaru własnego samych paneli fotowoltaicznych, jak również ich konstrukcji wsporczych oraz ewentualnego balastu stosowanego w przypadkach, gdy nie jest możliwe kotwienie konstrukcji wsporczej paneli do elementów nośnych szkieletu budynku. Panele umieszczane na dachach powodują również lokalne zwiększenia wartości obciążeń wiatrem i śniegiem, przy czym wartości tych obciążeń nie można wyznaczyć, stosując przepisy aktualnie obowiązujących norm przedmiotowych. Przeprowadzone badania wskazują na to, że wpływ tych elementów na obciążenia połaci dachowych jest istotny, a powszechność stosowania instalacji tego typu wymusza konieczność przeprowadzenia w najbliższym czasie nowelizacji zapisów norm w tym zakresie.

Zastosowane w przykładowym obiekcie układy nośne głównych ram poprzecznych zaprojektowano ze stalowych profili blachownicowych o zmiennej wysokości przekroju, co pozwoliło uzyskać odpowiednią nośność konstrukcji przy jednoczesnej redukcji zużycia materiału w porównaniu z tradycyjnymi rozwiązaniami z elementami o stałej wysokości przekroju. Niewielką masą charakteryzują się również płatwie zaprojektowane z kształtowników giętych na zimno, co umożliwiło osiągnięcie optymalnej równowagi między kosztami, efektywnością i wytrzymałością konstrukcji. Uzyskany dla środkowych modułów hali wskaźnik zużycia stali wyniósł zaledwie $25,19 \text{ kg/m}^2$, co jest bardzo zadowalającym wynikiem, biorąc pod uwagę to, że w tradycyjnych rozwiązaniach wskaźnik zużycia stali dla konstrukcji tego typu waha się od ok. $40,00 \text{ kg/m}^2$ do ok. $60,00 \text{ kg/m}^2$.

Zaprojektowana hala stanowi przykład nowoczesnego podejścia do projektowania konstrukcji stalowych. Integracja paneli fotowoltaicznych z budynkiem oraz odpowiednia forma konstrukcji zwiększyły efektywność energetyczną budynku, przyczyniając się do zmniejszenia zapotrzebowania na nieodnawialną energię pierwotną, a także obniżyły koszty budowy oraz późniejszej eksploatacji budynku. Przykładowy projekt może stanowić podstawę do realizacji nowoczesnych obiektów przemysłowych, które będą łączyć w sobie współczesne trendy funkcjonalności, bezpieczeństwa konstrukcyjnego oraz zrównoważonego rozwoju.

LITERATURA

- [1] Lewkowicz S., *Panele bifacialne GLASS-GLASS – czym się są i dla kogo?*, Columbus Energy, 24.04.2020, <https://columbusenergy.pl/blog/moduly-bifacialne-glass-glass/> [dostęp: 16.11.2024].
- [2] PN-EN 1991-1-4:2008, *Eurokod 1: Oddziaływanie na konstrukcje – Część 1–4: Oddziaływania ogólne – Oddziaływania wiatru*, Polski Komitet Normalizacyjny, Warszawa 2008.
- [3] *Konstrukcje BAKS do montażu paneli fotowoltaicznych 2021/22: innowacyjna technologia*, Baks, https://baks.com.pl/wp-content/uploads/2021/04/pv_2021.pdf [dostęp: 16.11.2024].
- [4] PN-EN 1991-1-3:2005, *Eurokod 1: Oddziaływanie na konstrukcje – Część 1–3: Oddziaływania ogólne – Obciążenie śniegiem*, Polski Komitet Normalizacyjny, Warszawa 2005.
- [5] Kahana L., *Scientists analyze seasonal performance of rooftop, vertical PV in the Arctic*, pv magazine, 30.08.2023, <https://www.pv-magazine.com/2023/08/30/scientists-analyze-seasonal-performance-of-rooftop-vertical-pv-in-the-arctic/> [dostęp: 16.11.2024].
- [6] Grammou N., Petermann I., Puthi R., *Snow loads on flat roofs with elevated solar panel arrays*, Steel Construction, vol. 12, iss. 4, 2019, s. 364–371, <https://doi.org/10.1002/stco.201900031> [dostęp: 16.11.2024].
- [7] Geurts C.P.W., van Bentum C.A.: *Wind loads on solar energy roofs*, Heron, vol. 52, no. 3, 2007, s. 201–222, <http://heronjournal.nl/52-3/2.html> [dostęp: 16.11.2024].
- [8] 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.
- [9] PN-EN 1993-1-3:2008, *Eurokod 3: Projektowanie konstrukcji stalowych – Część 1–3: Reguły ogólne – Reguły uzupełniające dla konstrukcji z kształtowników i blach profilowanych na zimno*, Polski Komitet Normalizacyjny, Warszawa 2008.
- [10] PN-EN 1993-1-5:2008, *Eurokod 3: Projektowanie konstrukcji stalowych – Część 1–5: Blachownice*, Polski Komitet Normalizacyjny, Warszawa 2008.
- [11] PN-EN 1993-1-8:2006, *Eurokod 3: Projektowanie konstrukcji stalowych – Część 1–8: Projektowanie węzłów*, Polski Komitet Normalizacyjny, Warszawa 2006.
- [12] *Właściwości przekrojów*, Dlubal, https://www.dlubal.com/pl/wlasciwosci-przekrojow/?srsltid=AfmBOop8ThiaQuRbJVO61MTISaEuTh_FaDV-XG39Q7pggBFXKM-8n7vOV [dostęp: 16.11.2024].

Tomasz Dąbrowa*

OCENA MOŻLIWOŚCI DETEKCJI UBYTKÓW LEŚNYCH Z WYKORZYSTANIEM INDEKSÓW WEGETACYJNYCH OBLICZONYCH NA PODSTAWIE DANYCH OPTYCZNYCH Z SATELITY SENTINEL-2A NA PRZYKŁADZIE BORÓW TUCHOLSKICH

Celem niniejszej pracy jest zbadanie możliwości detekcji ubytku powierzchni leśnej z wykorzystaniem optycznych zobrażeń satelitarnych. Do przetworzenia danych wykorzystywany jest algorytm napisany w języku Python działający na maszynie wirtualnej dostarczonej przez firmę CloudFerro. Dostęp do danych programu Copernicus zapewniany jest za pośrednictwem serwisu CREODIAS. Dane z satelity Sentinel-2A w rozdzielczości przestrzennej 20 m pozwalają na obliczenie indeksów wegetacyjnych, tj. NDVI, NDRE, NDII, SAVI oraz EVI2. Do analizy wybrano działkę leśną należącą do Nadleśnictwa Ryteł w Borach Tucholskich, na której nastąpiło zniszczenie drzewostanu na skutek wichury w sierpniu 2017 roku. Uzyskane w ten sposób szeregi czasowe średnich wartości wskaźników pozwalają na analizę zmian drzewostanu. Na końcu przedstawiono wnioski oraz wskazano możliwe ograniczenia takiej metody.

ASSESSMENT OF THE POSSIBILITY OF DETECTION OF FOREST LOSSES USING VEGETATION INDEXES CALCULATED FROM SENTINEL-2A OPTICAL DATA ON THE EXAMPLE OF THE BORY TUCHOLSKIE

The aim of this work is to investigate the possibilities of detecting forest area loss using optical satellite imagery. An algorithm written in Python, operating on a virtual machine provided by CloudFerro, is used to process the data. Access to Copernicus data is provided via the CREODIAS service. Data from the Sentinel-2A satellite at a spatial resolution of 20 m allow for the calculation of vegetation indices, i.e. NDVI, NDRE, NDII, SAVI and EVI2. A forest plot belonging to the Ryteł Forest District in the Bory Tucholskie was selected for analysis, where the tree stand was destroyed as a result of a storm in August 2017. The time series of average values of the indices obtained in this way allow for the analysis of changes in the tree stand. Finally, conclusions were drawn and possible limitations of this method were indicated.

* AGH Akademia Górniczo-Hutnicza, Wydział Technologii Kosmicznych, Koło Naukowe AGH Spatial Technologies and Remote Sensing (AGH STARS).

1. WPROWADZENIE

Wyścig kosmiczny, rozumiany jako rywalizacja pomiędzy Stanami Zjednoczonymi a Związkiem Radzieckim w zakresie rozwoju technologii kosmicznych, doprowadził do historycznego osiągnięcia, jakim było umieszczenie człowieka w przestrzeni kosmicznej. Pierwsze kosmiczne przedsięwzięcia miały jednak zastosowanie głównie militarne i propagandowe. Możliwość otrzymywania danych demaskujących położenie strategicznych obiektów wojskowych przeciwnika w sposób nienaruszający jego przestrzeni powietrznej okazała się kluczowa.

Ówczesnych nowości technicznych nie sposób było ograniczyć jedynie do zastosowań wojskowych. Rozpoczęto wykorzystywanie technologii wojskowej do celów cywilnych. Amerykańska Narodowa Agencja Aeronautyki i Przestrzeni Kosmicznej (NASA) uruchomiła program Landsat. Pierwszy satelita wchodzący w skład tego programu, Landsat-1, został umieszczony na orbicie w 1972 roku [1]. Zaczął dostarczać dane w czterech pasmach spektralnych. Od tego momentu obserwujemy rozwój teledetekcji satelitarnej.

Zobrazowania z programu Landsat były możliwe do uzyskania odpłatnie do 2008 roku. W roku 2014 Europejska Agencja Kosmiczna (ESA) powołała do życia program Copernicus [2], aby mieć do dyspozycji własny system obserwacji Ziemi. Jest to:

rewolucyjny unijny program obserwacji i monitorowania Ziemi, zapewniający wgląd w planetę i jej środowisko z korzyścią dla wszystkich obywateli Europy. Za sprawą rozmaitych technologii, od satelitów w przestrzeni kosmicznej do systemów pomiarowych na ziemi, morzu i w powietrzu, Copernicus dostarcza w sposób otwarty i bezpłatny dane operacyjne oraz zapewnia usługi informacyjne w wielu różnych obszarach zastosowań [3, s. 4].

W ramach programu Copernicus prowadzi się akwizycję danych – m.in. optycznych oraz radarowych. W niniejszej pracy wykorzystano dane optyczne z satelity Sentinel-2A (rys. 1), czyli zobrazowania wykonane w poszczególnych pasmach promieniowania elektromagnetycznego. Przeprowadzone wcześniej badania wykazały, że do wykrywania zmian w drzewostanie możliwe jest wykorzystanie indeksu odbicia starzenia się roślin (PSRI), ale również NDVI oraz NDRE [4]. W pracy zdecydowano się na wykorzystanie szerszej gamy indeksów wegetacyjnych, zgodnie z metodyką przedstawioną przez autora w [5].



Rys. 1. Satelita Sentinel-2A

Źródło: [6]

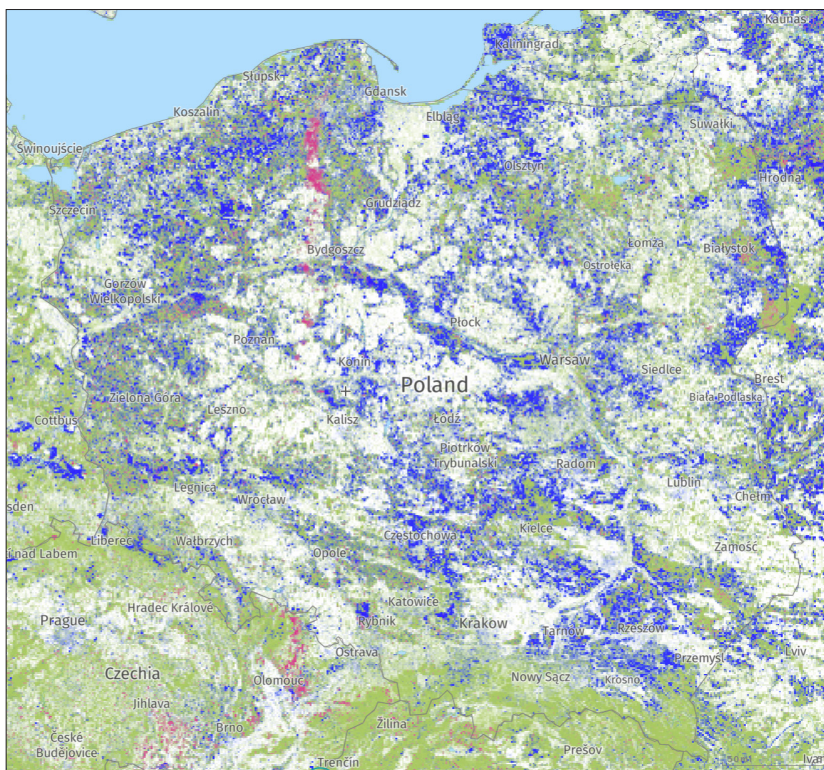
Celem badań jest sprawdzenie, czy stworzony przez autora niniejszej pracy algorytm obliczający indeksy wegetacyjne na podstawie danych satelitarnych [5] i bazujący na infrastrukturze technicznej firmy CloudFerro [7] można wykorzystać do detekcji ubytków leśnych.

2. LOKALIZACJA OBSZARU BADAWCZEGO

W celu wyboru lokalizacji do przetestowania algorytmu pod kątem detekcji ubytku lasów należało znaleźć obszar, w którym nastąpił drastyczny spadek przestrzeni leśnej. Zdecydowano się skorzystać z serwisu Global Forest Watch. Jest to

internetowa platforma, która zapewnia dane i narzędzia do monitorowania lasów. Wykorzystując najnowocześniejszą technologię, GFW umożliwia każdemu dostęp w czasie niemal rzeczywistym do informacji o tym, gdzie i jak zmieniają się lasy na całym świecie (tłum. T.D.) [8].

Serwis zapewnia dostęp do danych rastrowych w postaci trzech klas. Klasa oznaczona kolorem zielonym reprezentuje lasy, niebieskim – przyrost drzewostanu, a czerwonym – ubytek lasów. W ujęciu ogólnopolskim w okresie 2016–2018 widoczny jest znaczny ubytek powierzchni lasów na obszarze Borów Tucholskich (rys. 2). Obszar ten w przybliżeniu obejmuje nadleśnictwa Lipusz, Ryteł oraz Czersk.

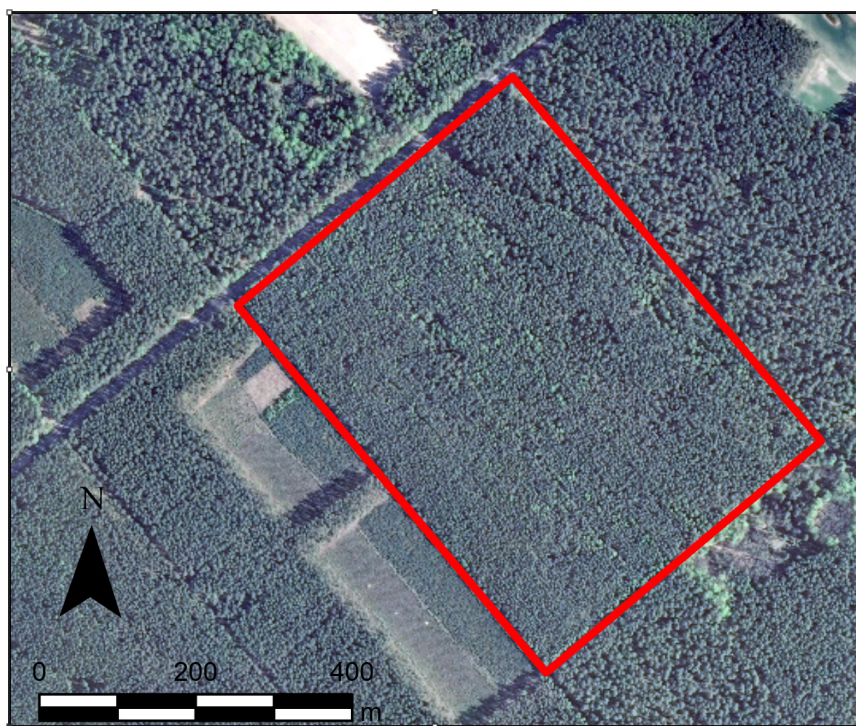


Rys. 2. Zmiany powierzchni lasów na obszarze Polski w latach 2016–2018. Kolorem czerwonym oznaczono ubytki. Zrzut ekranu serwisu Global Forest Watch
Źródło: [9]

Za taki stan rzeczy odpowiadają nawałnice, które przeszły przez ten teren w nocy z dnia 11 na 12 sierpnia 2017 roku. Dyrektor Lasów Państwowych, Konrad Tomaszewski, uznał to wydarzenie za największą klęskę w historii tej jednostki Skarbu Państwa. Zniszczonych zostało 10 mln m³ drzew i 120 tys. ha lasu. Największe zniszczenia odnotowano w nadleśnictwach Lipusz (2,3 mln m³ drzew) oraz Ryteł (2 mln m³) [10]. „W samej Regionalnej Dyrekcji Lasów Państwowych w Toruniu w jeden dzień na ziemi zaległo albo zostało połamanych łącznie 5,5 mln m³ drzew. W normalnych warunkach pozyskanie takiej ilości drewna w ramach zrównoważonej gospodarki leśnej zajmuje wszystkim nadleśnictwom toruńskiej dyrekcji niemal trzy lata” [10].

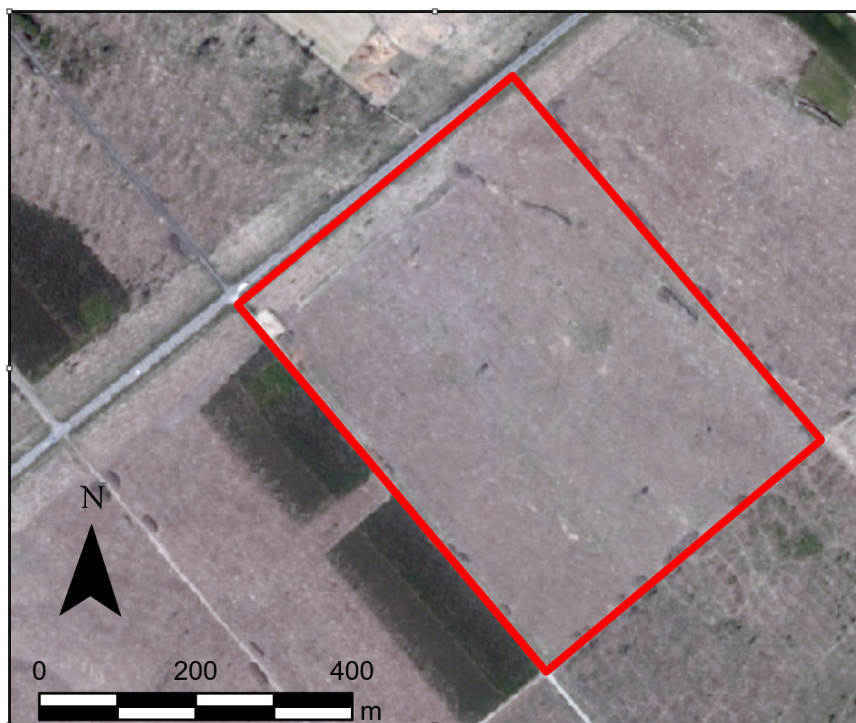
Po kataklizmie przystąpiono do usuwania drzew i odnawiania drzewostanu [10]. Istotnym problemem był fakt, że w tamtych latach w Nadleśnictwie Ryteł nie obowiązywał plan urządzenia lasu [11].

Do wybrania obszaru cechującego się znacznym zniszczeniem drzewostanu wykorzystano narzędzie szybkiego podglądu archiwalnych ortofotomap dostępne w Google Earth Pro [12]. Wybrano działkę numer 220204_5.0010.3094 położoną w Rytle przy drodze krajowej nr 22, w gminie Czersk, powiecie chojnickim i województwie pomorskim. Zmianę w zalesieniu można dostrzec, analizując ortofotomapy sprzed kataklizmu (rys. 3) i po nim (rys. 4).



Rys. 3. Ortofotomapa z 8 maja 2016 roku z zaznaczoną czerwoną obwódką działkę

Źródło: na podstawie [12], zmodyfikowany



Rys. 4. Ortofotomapa z 30 maja 2019 roku z zaznaczoną czerwoną obwódką działką

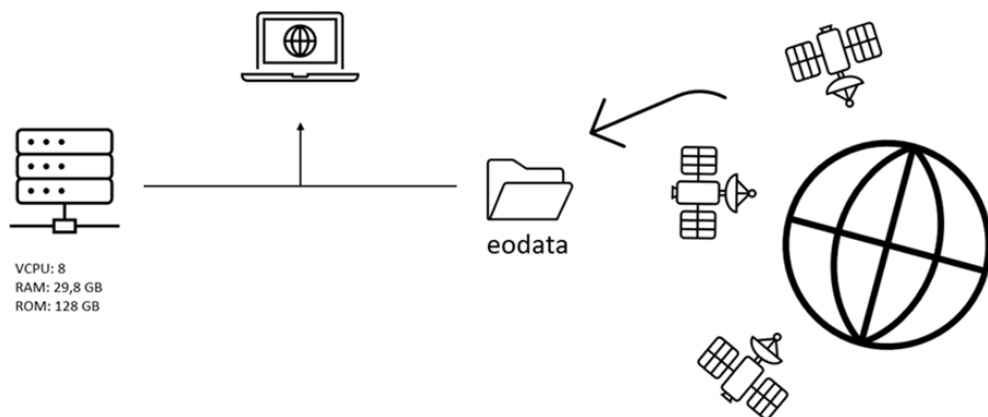
Źródło: na podstawie [12], zmodyfikowany

Przegląd danych pozwolił ustalić, że na wybranym obszarze badawczym nastąpiło nagłe zniszczenie drzewostanu, co kwalifikuje go do dalszych badań.

3. METODYKA BADAŃ

Do przeprowadzenia analizy obrazów satelitarnych pod kątem detekcji zmian w zagospodarowaniu powierzchni terenu należało przygotować odpowiednie zobrażenia satelitarne. Zdecydowano się na automatyzację tego procesu i opracowanie algorytmu działającego z wykorzystaniem infrastruktury technicznej firmy CloudFerro S.A., która dostarcza zasoby obliczeniowe na potrzeby pracy z danymi teledetekcyjnymi [7].

System CREODIAS od CloudFerro umożliwia uzyskanie dostępu do ogromnej ilości danych z różnych satelitów, w tym również z Sentinel-2A. Aby z niego skorzystać, należy utworzyć maszynę wirtualną w środowisku obliczeniowym firmy CloudFerro. Wówczas użytkownik będzie miał dostęp do katalogu *eodata*, w którym znajdują się zobrażenia satelitarne. Te dane są przechowywane w centrum danych CloudFerro, zatem nie ma konieczności ich pobierania, co pozwala zaoszczędzić czas. Użytkownik uzyskuje dostęp do maszyny wirtualnej, a co za tym idzie – do zobrażeń satelitarnych, łącząc się poprzez protokół SSH (rys. 5).



Rys. 5. Infrastruktura CloudFerro

Źródło: na podstawie [5], zmodyfikowany

Ponieważ analizie podlegają obszary, na których pokrywa leśna uległa zmniejszeniu, wykorzystane zostaną indeksy wegetacyjne, takie jak NDVI, NDRE, NDII, SAVI i EVI2, zgodnie z metodyką zaproponowaną przez autora we wcześniejszej publikacji [5]. Indeksy wegetacyjne wymagają pasma bliskiej podczerwieni, które umożliwia ocenę ilości chlorofilu. W przypadku wycinki drzew przewiduje się, że ilość chlorofilu widoczna w tym paśmie będzie mniejsza, zatem możliwa będzie zdalna detekcja deforestacji. Do obliczenia indeksów konieczne są pasma: czerwone (RED), bliskiej podczerwieni (NIR), czerwonej krawędzi (RED_EDGE) oraz krótkofalowej podczerwieni (SWIR). Wszystkie odznaczają się rozdzielczością przestrzenną 20 m. Użyte indeksy zaprezentowano w tabeli 1.

Tabela 1. Wykorzystane indeksy wegetacyjne

Indeks	Wzór	Opis
<i>Normalized Difference Vegetation Index</i> (NDVI)	$NDVI = \frac{NIR - RED}{NIR + RED}$	Znormalizowany różnicowy wskaźnik wegetacji, stosowany jako podstawowe narzędzie do zdalnej analizy stanu roślinności [13]
<i>Normalized Difference Red Edge</i> (NDRE)	$NDRE = \frac{NIR - RED_EDGE}{NIR + RED_EDGE}$	Indeks znajdujący zastosowanie do dokładniejszej analizy stanu bujniejszej roślinności, m.in. w monitoringu zawartości chlorofilu z uprawach [14]
<i>Normalized Difference Infrared Index</i> (NDII)	$NDII = \frac{NIR - SWIR}{NIR + SWIR}$	Indeks wykorzystywany m.in. do monitorowania obszarów miejskich i wiejskich podczas okresu wegetacyjnego [15]

Tabela 1 cd.

<i>Soil-Adjusted Vegetation Index (SAVI)</i>	$SAVI = \frac{(1 + L)(NIR - RED)}{NIR + RED + L}$	Indeks służący do oceny kondycji roślinności z uwzględnieniem wpływu gleby i odsłonięcia podłoża [16] (parametr korekcyjny L określa stopień odkrycia gleby)
<i>Enhanced Vegetation Index 2 (EVI2)</i>	$EVI2 = \frac{NIR - RED}{NIR + 2,4 \cdot RED + 1}$	Indeks znajdujący zastosowanie m.in. w analizie kondycji pól uprawnych [17] (modyfikacja wskaźnika EVI polegająca na dodaniu dodatkowych współczynników 2,4 oraz 1 [18])

Źródło: na podstawie [5]

W niniejszej pracy wykorzystano algorytm zaproponowany przez autora we wcześniejszej publikacji [5]. Jest napisany w języku Python i umieszczony na maszynie wirtualnej jako plik Jupyter Notebook.

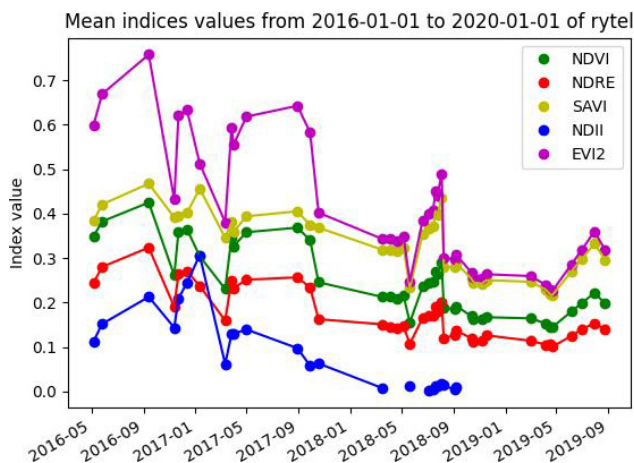
Przed rozpoczęciem przetwarzania danych z wykorzystaniem algorytmu należy najpierw zdefiniować przestrzennie i czasowo obszar badań. Program wymaga podania ścieżki do pliku ESRI Shapefile w układzie 1992 (EPSG:2180). Oprócz tego niezbędne jest podanie daty rozpoczęcia oraz zakończenia analizowanego okresu w formacie YYYY-MM-DD. Po określeniu danych wejściowych skrypt wysyła zapytanie do serwisu CREODIAS celem uzyskania ścieżek bezwzględnych do zobrazowań znajdujących się w folderze *eodata*. Odpowiedź algorytm uzyskuje w formacie JSON, który dekoduje i zapisuje w pamięci operacyjnej jako tabelę ze ścieżkami do poszczególnych pasm zobrazowań posegregowanych chronologicznie. Po wykonaniu powyższych operacji skrypt rozpoczyna obliczenie indeksów wegetacyjnych.

W każdej iteracji skrypt przycina do analizowanego obszaru warstwę SCL, która wstępnie klasyfikuje zagospodarowanie powierzchni terenu. Jeśli moda warstwy SCL wskazuje na obecność chmur i innych zakłócających czynników, wówczas takie zobrazowanie nie podlega przetwarzaniu. Jeżeli moda tego nie wykaże, to przycinane do obszaru są pozostałe pasma, które wykorzystuje się do obliczenia indeksów wegetacyjnych. Po każdej iteracji obliczana jest średnia każdego indeksu z danego dnia. Po przetworzeniu wszystkich dostępnych zobrazowań dokonuje się interpolacji liniowej brakujących wartości i eksportuje się wyniki jako wykres liniowy do formatu JPG oraz jako szeregi czasowe do formatu CSV.

4. ANALIZA

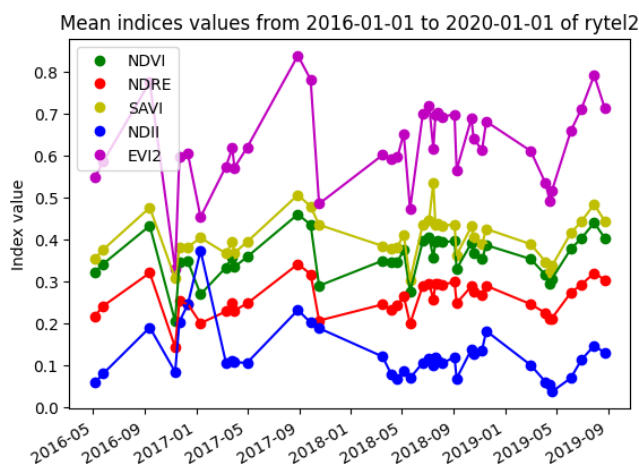
W celu przeprowadzenia analizy z wykorzystaniem skryptu w języku Python zdefiniowano przedział czasowy od 1 stycznia 2016 do 1 stycznia 2020 roku. Zakres ten obejmuje nie tylko okres kataklizmu, ale również czas przed nim i po nim (rys. 6). Dolną granicę wyznacza data rozpoczęcia misji Sentinel-2A, co sprawia, że dane z 2015 roku są niepełne. Z tego powodu analizuje się dane dopiero od początku 2016 roku. Do analizy przeznaczono zobrazowania

z zachmurzeniem poniżej 20%, których uzyskano 43. Dodatkowy filtr wykorzystujący warstwę SCL odrzucił zobrazowania z trzech dni, dlatego ostatecznie w badaniach wykorzystano 40 zobrazowań.



Rys. 6. Wykres liniowy wartości indeksów dla analizowanej działki w Rytlu w okresie od 1.01.2016 do 1.01.2020

Dla porównania wykonano również wykres zmienności dla działki sąsiedniej (rys. 7), na której – ze względu na niewielką wysokość drzew – nie nastąpiło zniszczenie drzewostanu w wyniku kataklizmu. Widoczna jest różnica w zmienności poszczególnych wskaźników. Na wykresie badanej działki sąsiedniej, niezniszczonej (rys. 7), wartości indeksów po 2018 roku nie uległy obniżeniu – w przeciwieństwie do działki zniszczonej (rys. 6).



Rys. 7. Wykres liniowy wartości indeksów dla działki sąsiedniej, na której nie nastąpiło zniszczenie drzewostanu, w okresie od 1.01.2016 do 1.01.2020

Na wykresie widoczny jest brak wartości NDII od jesieni 2018, co wynika z tego, że wskaźnik ten przyjmuje wartości poniżej zera. Algorytm od samego początku został zaprojektowany do pracy z danymi dotyczącymi obszarów lądowych, dlatego ewentualne błędy spowodowane wartościami spoza przedziału od -1 do 1 są korygowane przez wycinanie wartości anomalnych. W związku z tym konieczne jest wykluczenie wskaźnika NDII z dalszej analizy.

Moment katastrofy nie jest na wykresie widoczny. Zniszczenie drzewostanu nie wpłynęło na wartości indeksów uzyskanych na podstawie danych optycznych. Jest to spowodowane tym, że teren po drzewostanie nie został jeszcze oczyszczony. Proces usuwania zniszczonych drzew rozpoczął się później, co jest już możliwe do zaobserwowania na wykresie. Okres wegetacyjny w 2018 roku cechuje się znacznie niższymi wartościami analizowanych indeksów wegetacyjnych niż okres wegetacyjny w roku poprzednim. Na potrzeby dalszej analizy można więc podzielić badany przedział czasowy następująco:

- okres A: od 1.01.2016 do 1.01.2018,
- okres B: od 1.01.2018 do 1.01.2020.

Dla każdego z okresów wyznaczono średnie wartości wszystkich analizowanych indeksów (tab. 2).

Tabela 2. Średnie wartości indeksów w analizowanych okresach

Indeks	Okres A	Okres B
NDVI	0,34	0,19
NDRE	0,24	0,13
SAVI	0,4	0,29
EVI2	0,58	0,31

Średnie wartości indeksów w okresie B (po kataklizmie) są prawie o połowę niższe niż w okresie A (przed katastrofą). Powodem tego jest rozpoczęcie usuwania zniszczonego drzewostanu, a co za tym idzie – odsłonięcie gleby porośniętej roślinnością o słabszej wegetacji. W związku z tym wartości indeksów nie mogły spaść do zera.

Poszczególne indeksy różnią się wartościami, lecz wykazują zbliżone trendy. Istotną różnicą między nimi jest współczynnik zmienności, który może stanowić pomocne narzędzie w analizie szeregów czasowych. Zgodnie z analizą autora zawartą we wcześniejszej publikacji [5] dla obu okresów obliczony zostanie współczynnik zmienności (tab. 3) zdefiniowany jako:

$$CV = \frac{\sigma}{\mu} \cdot 100\%,$$

gdzie:

- σ – odchylenie standardowe,
- μ – średnia arytmetyczna.

Tabela 3. Współczynniki zmienności indeksów w analizowanych okresach [%]

Indeks	Okres A	Okres B
NDVI	17,20	16,09
NDRE	19,39	15,43
SAVI	8,06	16,09
EVI2	19,47	17,73

Na rysunku 6 widać, że wykresy liniowe indeksów w okresie A różnią się znacznie, podczas gdy w okresie B prezentują bardzo podobny przebieg i różnią się jedynie wartościami. Obliczone dla każdego indeksu współczynniki zmienności (tab. 3) zdają się to potwierdzać. Zmienność ich wartości w okresie B jest wyraźnie mniejsza niż w okresie A. Wyjątkiem jest indeks SAVI, czego wytłumaczeniem może być złe dobranie parametru L definiującego stopień odsłonięcia gleby. Na podstawie obliczonych danych można zaobserwować, że zróżnicowanie wartości indeksów jest większe w przypadku bujnego drzewostanu – dotyczy to zwłaszcza indeksu EVI2. Z kolei w przypadku roślinności o słabszej vegetacji wyniki pomiarów wszystkich badanych wskaźników wykazują mniejszą zmienność.

5. PODSUMOWANIE I WNIOSKI

Celem niniejszej pracy było sprawdzenie możliwości opracowanego przez autora algorytmu w języku Python [5], bazującego na infrastrukturze CloudFerro udostępnianej przez serwis CREODIAS. Przetestowano jego funkcjonalność pod względem detekcji ubytków na wybranej działce w Borach Tucholskich w Nadleśnictwie Ryteł. Przetworzono 40 zobrazowań z lat 2016–2019. Na podstawie dostarczonych przez algorytm danych niemożliwe było wykrycie momentu wichury, która spowodowała zniszczenie drzewostanu. Wynika to z faktu, że dane optyczne, zwłaszcza w paśmie bliskiej podczerwieni, nie pozwoliły zarejestrować ubytku drzew, ponieważ zniszczone drzewa nie zostały jeszcze usunięte przez odpowiednie służby leśne. Z uwagi na ogromną skalę zniszczeń szacowano, że proces usuwania drzewostanu potrwa do 2019 roku [11]. Dopiero po tym czasie skutki katastrofy stały się widoczne w danych wygenerowanych przez skrypt. Wartości współczynników uległy zmniejszeniu w latach 2018–2019. Co więcej, przed kataklizmem wykresy liniowe poszczególnych indeksów różniły się bardziej niż w okresie po ubytku drzew, kiedy to miały bardzo zbliżony przebieg. Obliczenie współczynników zmienności potwierdza tę obserwację.

Podsumowując, algorytm dostarczył odpowiednie nadające się do analizy dane. Dane optyczne mogą być bardzo przydatnym narzędziem do monitorowania zmian w zagospodarowaniu powierzchni terenu. Za przykład może posłużyć mapa pokrycia terenu Polski przygotowana przez Polską Agencję Kosmiczną [19]. Wycinka lub ubytek drzew mogą całkowicie zmienić charakter obszaru, zwłaszcza gdy drzewa zostaną natychmiast usunięte. W analizowanym studium przypadku tak się nie stało, dlatego moment kataklizmu nie mógł być jednoznacznie określony. W celu detekcji ubytków w drzewostanach warto zatem rozważyć skorzystanie

z danych radarowych [20], których odpowiednie przetworzenie jest źródłem informacji o zmianie w wysokości koron drzew, co z kolei może stanowić uniwersalną metodę detekcji wycinki lasów.

Podziękowania

Dziękuję mojemu opiekunowi dr. inż. Michałowi Lupie za pomoc w badaniach oraz firmie CloudFerro S.A. za udostępnienie infrastruktury technicznej.

LITERATURA

- [1] Lauer D.T., Morain S.A., Salomonson V.V., *The Landsat program: Its origins, evolution, and impacts*, Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, vol. 63, iss. 7, 1997, s. 831–838, <https://pubs.usgs.gov/publication/70019209>.
- [2] *Rozporządzenie Parlamentu Europejskiego i Rady (UE) nr 377/2014 z dnia 3 kwietnia 2014 r. ustanawiające program Copernicus i uchylające rozporządzenie (UE) nr 911/2010*, <http://data.europa.eu/eli/reg/2014/377/oj> [dostęp: 22.02.2025].
- [3] European Commission: Directorate-General for Internal Market, Industry, Entrepreneurship and SMEs and Directorate-General for Communication, *Copernicus – Oko Europy na Ziemię*, Publications Office, 2015, <https://data.europa.eu/doi/10.2873/45136>.
- [4] Çinar T., Uslu A., Aydin A., *Monitoring the rehabilitation process of the windthrow area using UAS images and performance comparison of Sentinel-2A based different vegetation indexes*, Earth Science Informatics, vol. 18, iss. 2, 2025, 199, <https://doi.org/10.1007/s12145-025-01701-7>.
- [5] Dąbrowa T., *Wykorzystanie zobrazowań satelitarnych do wieloczasowej analizy zmienności indeksów wegetacyjnych*, Repozytorium AGH, Kraków 2025 [praca inżynierska].
- [6] Rama, *Sentinel 2-IMG 5873-white (crop)*, Wikimedia Commons, [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Sentinel_2-IMG_5873-white_\(crop\).jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Sentinel_2-IMG_5873-white_(crop).jpg) [dostęp: 22.02.2025].
- [7] CloudFerro, <https://cloudferro.com/pl/o-nas/> [dostęp: 22.02.2025].
- [8] *Global Forest Watch About*, Global Forest Watch, <https://www.globalforestwatch.org/about/> [dostęp: 23.02.2025].
- [9] *Global Forest Watch Map*, Global Forest Watch, <https://www.globalforestwatch.org/map/> [dostęp: 23.02.2025].
- [10] Trębski K., *Największy kataklizm w historii Lasów Państwowych*, Lasy Państwowe, 14.08.2017, <https://www.lasy.gov.pl/pl/informacje/aktualnosci/najwieksza-takaleska-w-historii-polskich-lasow> [dostęp: 23.02.2025].
- [11] Stowarzyszenie Pracownia na rzecz Wszystkich Istot, *Lasy poza kontrolą. Raport o wybranych nieprawidłowościach gospodarki leśnej w obszarach cennych przyrodniczo w Polsce*, Bystra 2021.
- [12] Google Earth Pro, <https://www.google.com/intl/pl/earth/about/versions/> [dostęp: 23.02.2025].
- [13] Pettorelli N., *The Normalized Difference Vegetation Index*, Oxford University Press, Oxford 2014, <https://doi.org/10.1093/acprof:osobl/9780199693160.001.0001>.

- [14] Boiarskii B., *Comparison of NDVI and NDRE Indices to Detect Differences in Vegetation and Chlorophyll Content*, Journal of Mechanics of Continua and Mathematical Sciences, spec. iss. 4, 2019, s. 20–29, <https://doi.org/10.26782/jmcms.spl.4/2019.11.00003>.
- [15] Bryk M., Kołodziej B., *Monitoring heterogeneous urban and rural area using Normalised Difference Infrared Index – a case study from SE Poland*, European Journal of Remote Sensing, vol. 52, iss. 1, 2019, s. 308–321, <https://doi.org/10.1080/22797254.2019.1604080>.
- [16] Huete A.R., *A soil-adjusted index (SAVI)*, Remote Sensing of Environment, vol. 25, iss. 3, 1988, s. 295–309, [https://doi.org/10.1016/0034-4257\(88\)90106-X](https://doi.org/10.1016/0034-4257(88)90106-X).
- [17] Pavlova A.I., *Application of vegetation indices for digital soil mapping based on Sentinel-2 space images*, Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture, vol. 13, no. 6, 2021, s. 119–131, <https://doi.org/10.12731/2658-6649-2021-13-6-119-131>.
- [18] Miura T., Yoshioka H., Fujiwara K., Yamamoto H., *Inter-Comparison of ASTER and MODIS surface reflectance and Vegetation Index products for synergistic applications to natural resource monitoring*, Sensors, vol. 8, iss. 4, 2008, s. 2480–2499, <https://doi.org/10.3390/s8042480>.
- [19] *Produkty POLSA*, Polish Space Agency POLSA, <https://polsa.gov.pl/aktywnosci/obszerwacja-ziemi/produkty-polsa/> [dostęp: 23.02.2025].
- [20] Flores-Anderson A.I., Herndon K.E., Thapa R.B., Cherrington E. (eds.), *The SAR Handbook: Comprehensive Methodologies for Forest Monitoring and Biomass Estimation*, SERVIR Global Science Coordination Office, National Space Science and Technology Center, Huntsville 2019, <https://doi.org/10.25966/nr2c-s697>.

Jakub Długosz*, Grzegorz Ficak, Łukasz Lisiecki*****

WPŁYW TEMPERATURY KUCIA NA WŁASNOŚCI MECHANICZNE WYROBÓW I ZUŻYCIU ENERGII PODCZAS ODKUWANIA KOTEW PRZEMYSŁOWYCH

W artykule przeanalizowano wpływ obniżenia temperatury nagrzewania wsadu na proces kucia oraz własności mechaniczne kotew przemysłowych. Motywacją badań było obniżenie kosztów energii potrzebnej do nagrzania wsadu w wyniku redukcji temperatury kucia. Badania przeprowadzono z wykorzystaniem symulacji komputerowej w programie QForm oraz bazując na eksperymentach w warunkach przemysłowych. Wyniki wykazały, że obniżenie temperatury nagrzewania wsadu prowadzi do wzrostu sił kucia wstępnego. Zbadano własności mechaniczne kotew odkutych w niższych temperaturach. Stwierdzono, że w większości przypadków wyroby spełniają normy jakościowe. Jednocześnie uzyskano znaczne oszczędności energetyczne. Ostateczne wyniki sugerują konieczność znalezienia optymalnego kompromisu między jakością wyrobu a efektywnością energetyczną procesu kucia.

THE INFLUENCE OF FORGING TEMPERATURE ON THE MECHANICAL PROPERTIES OF PRODUCTS AND ENERGY CONSUMPTION DURING THE FORGING OF INDUSTRIAL ANCHORS

This article analyzes the impact of lowering billet heating temperature on the forging process and the mechanical properties of industrial anchors. The motivation for the study was to reduce the energy costs associated with billet heating by decreasing the forging temperature. The research was conducted using simulations in the QForm software, as well as experiments carried out under industrial conditions. The results showed that reducing the billet heating temperature leads to an increase in the initial forging forces. The mechanical properties of anchors forged at lower temperatures were examined, and in most cases, the products met the required quality standards. At the same time, significant energy savings were achieved. The final results suggest the need to find an optimal compromise between product quality and the energy efficiency of the forging process.

* AGH Akademia Górniczo-Hutnicza, Wydział Inżynierii Metali i Informatyki Przemysłowej, Koło Naukowe Przeróbki Plastycznej Metali „Hefajstos”.

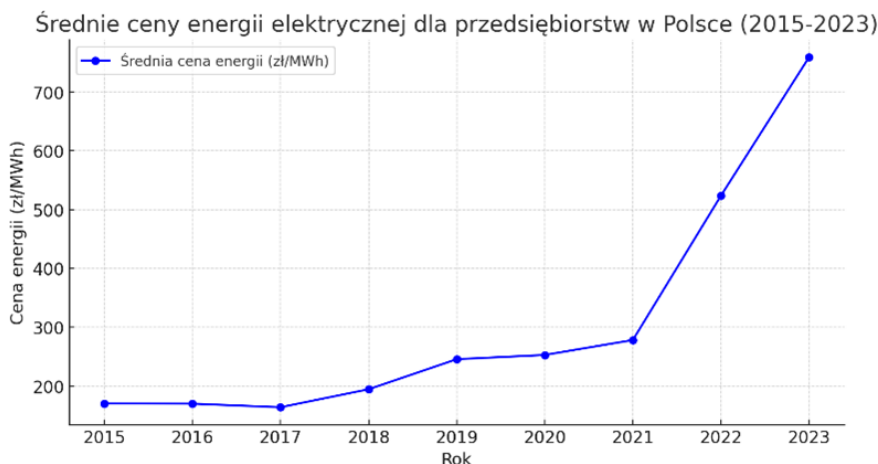
** AGH Akademia Górniczo-Hutnicza, Wydział Inżynierii Metali i Informatyki Przemysłowej, GK FORGE Sp. z o.o., Goleśzów.

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

1. WSTĘP

1.1. MOTYWACJA DO BADAŃ

Polska zмага się ze stale rosnącymi cenami energii elektrycznej. Podwyżki odczuwane są zwłaszcza przez zakłady przemysłowe i średnie przedsiębiorstwa. Do takich można zaliczyć kuźnie przemysłowe specjalizujące się w kuciu matrycowym. Trend wzrostu cen prądu w ostatnich latach przedstawiono na rysunku 1. W związku z rosnącymi cenami prądu wzrosły koszty jednostkowe produkowanych wyrobów, dlatego konieczna jest optymalizacja procesów produkcyjnych pozwalająca na zminimalizowanie zużycia prądu.



Rys. 1. Cena energii w Polsce na rynku konkurencyjnym

Źródło: [1]

W przypadku kuźni matrycowych głównym czynnikiem wpływającym na zużycie energii elektrycznej jest nagrzewanie wsadu do kucia, zwłaszcza gdy odbywa się ono w piecach oporowych lub indukcyjnych. Drugim czynnikiem jest eksploatacja maszyn kuźniczych. Gdy wsad jest nagrzewany w piecach indukcyjnych, możliwe jest obniżenie poboru energii przez obniżenie temperatury nagrzewania wsadu. Charakterystyka nagrzewania indukcyjnego powoduje, że zużycie prądu rośnie wraz ze wzrostem temperatury nagrzewanego wsadu. W związku z tym nawet niewielkie obniżenie temperatury docelowego nagrzewania wsadu może obniżyć koszty poboru energii.

1.2. PRZEDSTAWIENIE PROBLEMU

Celem badań było sprawdzenie wpływu obniżenia temperatury nagrzewania wsadu na przebieg procesu kucia i jakość odkuwanych kotew przemysłowych (rys. 2). Obniżenie temperatury kucia może wydatnie zmniejszyć koszty energii elektrycznej, a co za tym idzie – redukcję kosztów jednostkowych wyrobu. Dlatego też przeanalizowano proces kucia stali B500SN w obniżonych temperaturach (przyjmując jako standardową temperaturę kucia 1150°C).

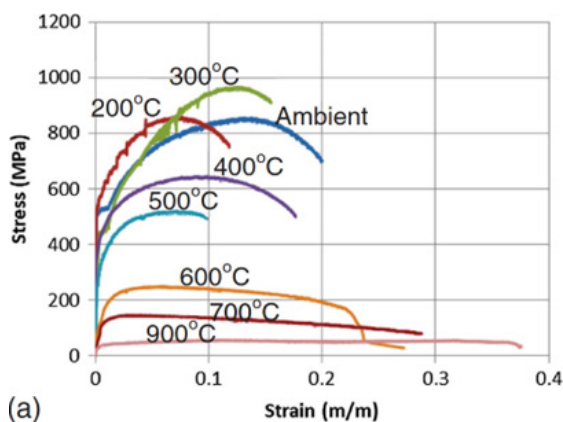


Rys. 2. Kotwa przemysłowa odkuwana w firmie GK Forge

Źródło: materiały własne

Pręty zbrojeniowe będące materiałem wsadowym są wykonane ze stali B500SN w technologii TEMPCORE i charakteryzują się ciągłym rdzeniem z osłonką martenzytyczno-bainityczną [2].

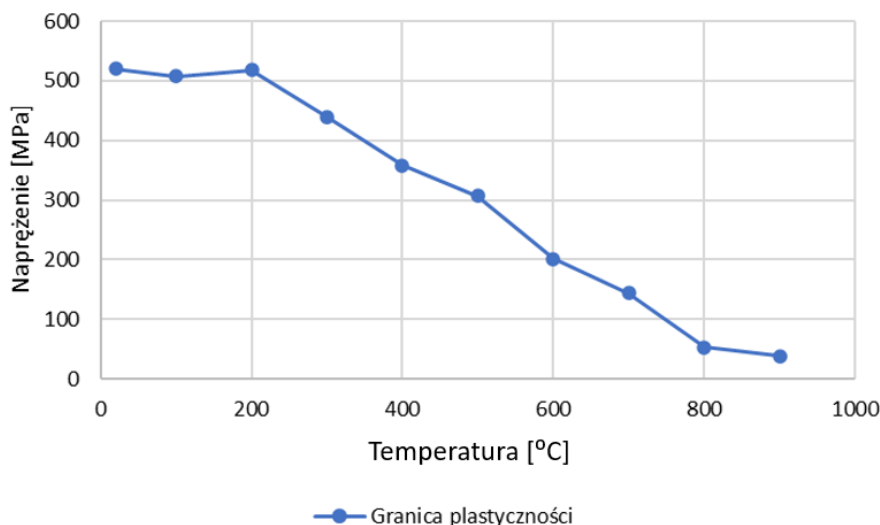
Autorzy pracy [3] przeanalizowali zależność granicy plastyczności i przebieg krzywych umocnienia dla prętów zbrojeniowych odkształcanych w różnych temperaturach. Uzyskane krzywe płynięcia przedstawiono na rysunku 3. Na tej podstawie przygotowano wykres zależności granicy plastyczności od temperatury.



Rys. 3. Krzywe umocnienia pręta zbrojeniowego o średnicy 10 mm

Źródło: [3]

Z wyjątkiem wartości temperatur 200°C i 300°C widać poprawę plastyczności w miarę wzrostu temperatury. Początkowe pogorszenie (zmniejszenie wydłużenia przy zerwaniu) należy tłumaczyć kruchością I rodzaju występującą w stalach węglowych [3, 4]. Krzywa temperatury 600°C odznacza się na tle krzywych niższych temperatur brakiem efektu umocnienia. Świadczy to o początku procesu rekryształizacji i zdrowienia podczas odkształcania. Kolejne krzywe nie wykazują już efektów stricte związanych z odkształceniem na zimno lub na ciepło. Na podstawie wykresów przeanalizowano zależność granicy plastyczności od temperatury, która została przedstawiona na rysunku 4.



Rys. 4. Granica plastyczności pręta zbrojeniowego Ø10 w funkcji temperatury przyjętej w badaniu

Źródło: opracowanie na podstawie [3]

W zakresie temperatur od 200°C do 800°C spadek jest niemal liniowy. Biorąc pod uwagę brak umocnienia od temperatury 600°C, jako minimalną temperaturę uwzględnianą w badaniach przyjęto 700°C.

1.3. METODYKA BADAŃ

Badania realizowano dwutorowo, prowadząc symulację komputerową w programie QForm oraz badania doświadczalne w warunkach przemysłowych. Poszczególne badania obejmowały:

- symulację w programie QForm 11.0.2.13 – przeprowadzono symulację nagrzewania oraz kucia wstępnego i na gotowo kotwy przemysłowej; warunki brzegowe do symulacji były dobrane tak, aby odzwierciedlały warunki procesu przemysłowego;
- kucie kotwy – kucie przeprowadzono w dwóch operacjach (wstępnej i wykończającej) na kuźniarce WSHK 100 firmy Hasenclever; nagrzewanie wsadu przeprowadzono nagrzewnicą indukcyjną do końcówek prętów; każdorazowo odkuto po pięć kotew w każdej z badanych temperatur;
- badania własności mechanicznych – w statycznej próbie rozciągania przyjęto następujące warunki próby: prędkość ruchu narzędzia przy rozciąganiu 10 mm/min; każdorazowo zrywano po dwie kotwy dla każdej temperatury kucia; mierzono granicę plastyczności, wytrzymałość na rozciąganie oraz wydłużenie przy zerwaniu;
- pomiar zużycia prądu – podczas kucia mierzono zużycie prądu potrzebne do nagrzania wsadu; miernik został zintegrowany z nagrzewnicą tak, aby monitorować zużycie w czasie rzeczywistym.

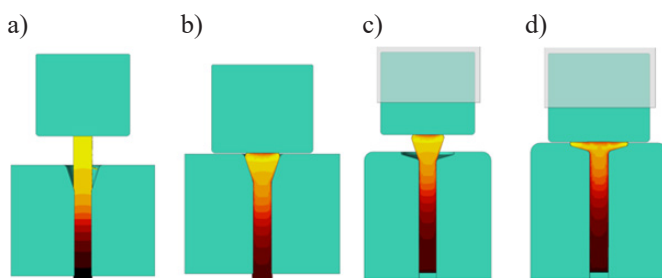
2. WYNIKI BADAŃ

2.1. SYMULACJA KOMPUTEROWA

Głównym celem symulacji było sprawdzenie sił kucia przy zastosowaniu różnej temperatury nagrzewania wsadu. Dzięki temu możliwe było dobranie odpowiedniej maszyny do przeprowadzenia testów w warunkach przemysłowych. Symulację komputerową przeprowadzono przy następujących parametrach brzegowych:

- wsad – pręt żebrowy Ø10 ze stali B500SN (model materiału pobrany z bazy programu QForm),
- nagrzewanie końcówki pręta w piecu próżniowym – pręt nagrzewano na długości 40 mm,
- temperatura nagrzewania wsadu – kolejno 1000°C, 900°C, 850°C, 800°C, 750°C i 700°C,
- maszyna – prasa mechaniczna o nacisku 63 t,
- brak smarowania między wsadem i narzędziem (warunki tarcia stal-stal bez smaru).

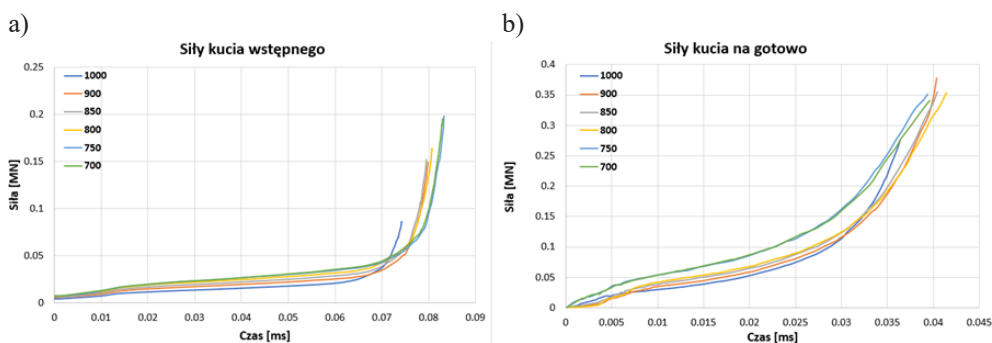
Na rysunku 5 przedstawiono przebieg symulacji. Widoczne jest kucie wstępne (na stożek) oraz na gotowo.



Rys. 5. Etapy symulacji komputerowej:

a) złożenie do symulacji; (b, c) kucie wstępne (spęczanie na stożek); d) kucie na gotowo

Na podstawie symulowanych wariantów stworzono wykresy zależności siły od czasu. Rysunek 6 przedstawia zmianę siły kucia wstępnego (rys. 6a) oraz kucia na gotowo (rys. 6b).



Rys. 6. Wykresy zmiany siły kucia w wykoju wstępnym (a) i na gotowo (b) wygenerowane w programie QForm

Przy kuciu wstępnym wykres siły odzwierciedla kolejne etapy wypełnienia wykroju. Najpierw widoczny jest powolny wzrost odpowiadający swobodnemu spęcznieniu materiału, a następnie bardziej gwałtowny odpowiadający etapowi, na którym materiał jest w kontakcie ze ściankami wykroju. Podobnie sytuacja wygląda przy kuciu na gotowo, przy czym ze względu na geometrię głowy kotwy wzrost siły w czasie jest bardziej dynamiczny. Zarejestrowana siła maksymalna nie przekracza dopuszczalnej siły kuźniarki, na jakiej realizowane są próby.

2.2. PRÓBY WYTRZYMAŁOŚCIOWE

Kotwy odkute w temperaturach 1000°C, 900°C, 800°C i 700°C poddano standardowej próbie jednoosiowego rozciągania w warunkach statycznych (prędkość ruchu narzędzia przy rozciąganiu równa 10 mm/min). Podczas testów rejestrowano granicę plastyczności i wytrzymałość na rozciąganie. Ważne było także zlokalizowanie miejsca pęknięcia i określenie, czy wystąpiło ono w strefie wpływu ciepła, czy na materiale nienagrzewanym. Wyniki przedstawiono w tabeli 1.

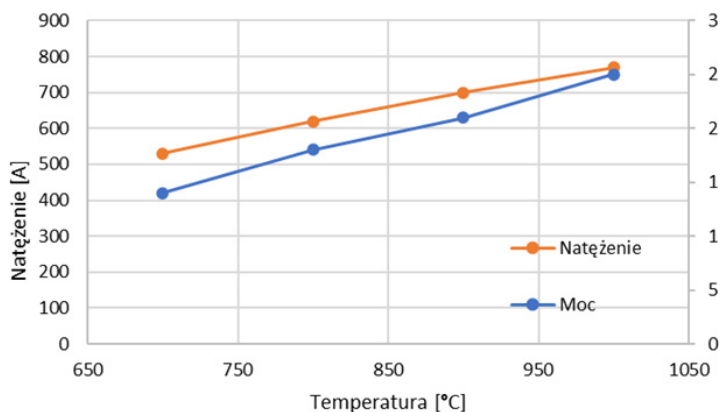
Tabela 1. Wyniki próby statycznego rozciągania

Próbka	Temperatura	R_e	R_m	R_e/R_m	Średnie R_e/R_m	Średnie R_e	Średnie R_m	Szyjka
	[°C]	[MPa]				[MPa]		
1000_1	1000	628	687	1,09	1,10	624,0	684,5	P
1000_2		620	682	1,10				
900_1	900	611	687	1,12	1,12	610,5	683,5	P
900_3		610	680	1,11				
800_3	800	632	688	1,09	1,10	628,0	690,0	P
800_2		624	692	1,11				
700_1	700	582	637	1,09	1,07	599,0	639,5	SWC
700_2		616	642	1,04				

oznaczenia: R_e – granica plastyczności, R_m – wytrzymałość na rozciąganie, R_e/R_m – zapas plastyczności, szyjka – miejsce zerwania próbki (P – poza strefą wpływu ciepła, SWC – na strefie wpływu ciepła)

2.3. ZUŻYCIE PRĄDU

Każdy cykl nagrzewania indukcyjnego charakteryzuje się zmiennym poborem prądu. Podczas prób mierzono pobór w szczycie mocy osiąganey przez nagrzewnicę. Mocą nagrzewania sterowano, zmieniając natężenie prądu. Rysunek 7 przedstawia zmianę poboru energii w zależności od temperatury materiału wsadowego. Można zauważyć znaczny spadek mocy przy obniżeniu temperatury nagrzewania.



Rys. 7. Zależność mocy i naprężenia od temperatury wstadu

3. ANALIZA WYNIKÓW

Przeprowadzone badania pozwoliły na ocenę wpływu temperatury nagrzewania wstadu na proces kucia oraz własności mechaniczne gotowych kotew przemysłowych. Wyniki symulacji komputerowej wykazały, że wraz z obniżeniem temperatury nagrzewania wzrasta wartość siły kucia, co może wpływać na dobór odpowiednich maszyn do procesu technologicznego. W szczególności dla temperatury 700°C zarejestrowano istotny wzrost siły kucia w porównaniu z wyższymi temperaturami, co może powodować zwiększone obciążenie narzędzi kuźniczych oraz wpływać na ich zużycie.

Badania obejmujące statyczną próbę rozciągania wykazały, że dla temperatur 1000°C, 900°C i 800°C własności mechaniczne wyrobów nie zostały pogorszone w stosunku do wyjściowych własności wstadu. Ponadto spełniają wymagania stawiane kotwom przemysłowym ($R_e > 510$ MPa, $R_m > 550$ MPa, zapas plastyczności $R_e/R_m > 1,08$). Jedynie w temperaturze 700°C pęknięcie wystąpiło w strefie wpływu ciepła. W związku z tym należy przypuszczać, że przy takiej temperaturze dochodzi do osłabienia materiału. Powodem może być zbyt niska temperatura, niewystarczająca do zahartowania nagrzanego obszaru.

Wyniki pomiarów zużycia prądu jednoznacznie wskazują, że obniżenie temperatury nagrzewania wstadu skutkuje znacznym zmniejszeniem poboru energii. Jest to zgodne z oczekiwaniami wynikającymi z charakterystyki nagrzewania indukcyjnego, gdzie wraz ze wzrostem temperatury wstadu rośnie pobór mocy. Największe oszczędności energetyczne uzyskano przy temperaturze 700°C, co potwierdza zasadność przeprowadzonych badań w kontekście optymalizacji kosztów produkcji. Jednocześnie należy stwierdzić, że obniżenie temperatury nie wpłynęło znacząco na jakość gotowych wyrobów. Ostatecznie wyniki badań sugerują, że obniżenie temperatury nagrzewania wstadu w procesie kucia może prowadzić do istotnych oszczędności energetycznych. Należy jednak wziąć pod uwagę możliwe konsekwencje związane ze zwiększonymi siłami kucia, a co za tym idzie – możliwym pogorszeniem trwałości narzędzi i zwiększonym obciążeniem maszyny kuźniczej.

4. WNIOSKI

Na podstawie wykonanych badań i przeanalizowanych wyników sformułowano następujące wnioski.

- Obniżenie temperatury nagrzewania wsadu powoduje wzrost sił kucia, co wymaga właściwego doboru parametrów procesu i może wpływać na zwiększone zużycie narzędzi.
- Kotwy odkuwane w niższej temperaturze zachowują wymagane własności mechaniczne.
- Redukcja temperatury nagrzewania skutkuje znacznymi oszczędnościami energii elektrycznej, co przekłada się na niższe koszty produkcji. Obniżenie temperatury kucia z 1000°C do 800°C spowodowało obniżenie poboru mocy o 28%.

Praca finansowana przez Ministerstwo Edukacji i Nauki w ramach programu DOKTORAT WDROŻENIOWY VII edycja.

LITERATURA

- [1] *Średnia cena sprzedaży energii elektrycznej na rynku konkurencyjnym (roczna i kwartalne)*, <https://www.ure.gov.pl/pl/energia-elektryczna/ceny-wskazniki/7852,Srednia-cena-sprzedazy-energii-elektrycznej-na-ryнку-konkurencyjnym-roczna-i-kwa.html> [dostęp: 21.02.2025].
- [2] *Bars for Cement Reinforcement*, <https://celsaho.com/long-products/bars-for-concrete-reinforcement/> [dostęp: 21.02.2025].
- [3] Masood Raf M., Basit Dahar A., Aziz T., Lodi S., *Elevated temperature testing of thermomechanically treated steel bars*, *Journal of Materials in Civil Engineering*, vol. 32(6), 2020, s. 905–909, [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0003202](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0003202).
- [4] Przybyłowicz K., *Metaloznawstwo*, WNT, Warszawa 2007.

Milosz Domagalski*

BUDOWA STANOWISKA DO WYZNACZANIA PRZYROSTU TEMPERATURY POWIETRZA SPOWODOWANEGO DZIAŁANIEM URZĄDZEŃ ELEKTRYCZNYCH I OŚWIETLENIA

Wykonanie bilansu zysków ciepła stanowi ważny etap procesu projektowania instalacji wentylacji i klimatyzacji, wpływający na wymiarowanie urządzeń odpowiedzialnych za uzdatnianie powietrza. Do wewnętrznych źródeł zysków ciepła zalicza się urządzenia elektryczne oraz systemy oświetleniowe. W pomieszczeniach, w których występuje znaczna liczba urządzeń oraz wymagane jest wysokie natężenie oświetlenia, zyski te mogą stanowić istotną część całkowitego bilansu ciepła. W praktyce projektowej wartości wewnętrznych zysków ciepła stanowiących efekt oddziaływania tych źródeł często przyjmuje się na podstawie uogólnionych danych tabelarycznych dostępnych w literaturze. W artykule przedstawiono założenia do budowy stanowiska do wyznaczania przyrostów temperatur powietrza spowodowanych pracą urządzeń elektrycznych oraz oświetlenia. Wykonano stanowisko i przeprowadzono badania oraz wyciągnięto wnioski z otrzymanych wyników pomiarów. Modyfikacja stanowiska powinna umożliwić ustalanie zysków ciepła.

CONSTRUCTION OF A TEST CHAMBER FOR MEASURING AIR TEMPERATURE INCREMENTS CAUSED BY ELECTRICAL EQUIPMENT AND LIGHTING

Implementation of a heat gain balance is an important phase in the design process of a ventilation and air conditioning system, influencing the dimensioning of the air treatment equipment. Among the sources of heat gains can be distinguished internal heat gains from electrical equipment and lighting. In rooms where there is a significant number of devices and high illumination intensity is required, these gains can make up a significant share of the total gain balance. In practice, the values of heat gains from these sources are often assumed on the basis of normalized tables available in the literature. The paper presents the assumptions for the construction of a test chamber for determining air temperature increments caused by electrical equipment and lighting. A test chamber was made and tests have been conducted, and conclusions were drawn from the obtained measurement results. The modification of the test chamber should allow heat gains to be determined.

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

1. WPROWADZENIE

Bardzo istotnym etapem podczas projektowania instalacji wentylacji i klimatyzacji jest sporządzenie bilansu zysków ciepła, ponieważ wpływa on na wymiarowanie urządzeń odpowiedzialnych za uzdatnianie powietrza, a także na ich współdziałanie z systemem centralnego ogrzewania. Wewnętrzne zyski ciepła związane z wyposażeniem budynku obejmują zyski ciepła wynikające z działania urządzeń elektrycznych oraz oświetlenia. W pomieszczeniach z dużą liczbą urządzeń lub wymagających wysokiego natężenia oświetlenia zyski te mogą mieć istotny udział w całkowitym bilansie ciepła. Z tego powodu istnieje potrzeba oszacowania rzeczywistych zysków ciepła związanych z oddziaływaniem tych źródeł, podczas gdy w praktyce bilans zysków ciepła wykonuje się na podstawie uogólnionych danych tabelarycznych dostępnych w literaturze [1–3].

Wymagania stawiane oświetleniu i urządzeniom elektrycznym są powiązane z postępem technologicznym i ulegają zaostrzeniu w kwestii energochłonności montowanego oświetlenia oraz stosowanych urządzeń. W ostatnich latach nastąpił też rozwój nowych technologii oświetlenia. Przepisy prawa zaostrzają wymagania dotyczące efektywności energetycznej oraz wpływu na środowisko stawiane budynkom oraz instalacjom i urządzeniom znajdującym się w budynkach. Istotny jest także aspekt ekonomiczny oraz przeciwdziałanie zagrożeniom wynikającym z braku dostępności paliw kopalnych, spowodowanym niestabilnością polityczną, wyczerpywaniem się złóż surowców kopalnych oraz wzrostem kosztów ich eksploatacji.

W Europie szczególnie ważne w tym zakresie są przepisy i dyrektywy Unii Europejskiej, w tym między innymi Dyrektywa Parlamentu Europejskiego i Rady (UE) 2024/1275 z dnia 24 kwietnia 2024 r. w sprawie charakterystyki energetycznej budynków [4] oraz Dyrektywa Parlamentu Europejskiego i Rady 2009/125/WE z dnia 21 października 2009 r. ustanawiająca ogólne zasady ustalania wymogów dotyczących ekoprojektu dla produktów związanych z energią [5].

Przepisy wymagają stosowania etykiet energetycznych na: lodówkach, zamrażalkach, urządzeniach chłodniczych z funkcją sprzedaży, pralkach, pralkosuszarkach, zmywarkach do naczyń, telewizorach i monitorach. W porównaniu z poprzednio obowiązującymi etykietami energetycznymi nastąpiła zmiana skali klas efektywności energetycznych, zmieniono zasady wyliczeń w odniesieniu do niektórych urządzeń, wprowadzono nową skalę hałasu i piktogramy odzwierciedlające cechy danego urządzenia oraz zwiększono czytelność etykiet energetycznych [6].

Etykiety energetyczne zawierają informację o klasie energetycznej urządzeń (od G do A – klasa A jest najbardziej innowacyjna i energooszczędna), zużyciu energii oraz cechach charakterystycznych dla danego typu urządzenia. Przykładowo w przypadku żarówek są to: wskaźnik oddawania barw, strumień cieplny, skala temperatury barwowej, żywotność, kąt wiązki oraz informacje na temat sposobu zasilania żarówki [7].

Zaprojektowane i wykonane stanowisko pomiarowe ma umożliwić ustalenie przyrostów temperatur powietrza wywołanych działaniem żarówek i urządzeń elektrycznych mieszczących się w jego komorze badawczej. W artykule zostaną opisane: jego budowa i sposób wykonania, metodyka przeprowadzonych badań oraz wnioski z nich wynikające.

2. ZASADY DZIAŁANIA I PORÓWNANIE PODDANYCH BADANIU ŻARÓWEK

Tradycyjne żarówki wytwarzają światło w wyniku przepływu prądu przez wolframowy żarnik zamknięty w szklanej bańce wypełnionej gazem obojętnym (np. argonem z 10-procentową domieszką azotu). Przepływ prądu powoduje podgrzanie żarnika do wysokiej temperatury (nawet do 2500°C) i jego świecenie. Jest to niestety mało efektywny proces – mniej niż 5% energii przekształcane jest w światło widzialne [8].

W odróżnieniu od tradycyjnych żarówek żarówki LED (*light emitting diode*) nie mają żarnika – składają się tylko z elementów elektronicznych. Światło emitowane jest podczas zjawiska elektroluminescencji zachodzącej w chipie półprzewodnikowym. Powoduje ją przepływ prądu przez chip.

Przyłożenie napięcia powoduje przepływ elektronów od katody do anody. Następnie elektrony emitowane są z katody do warstwy emisyjnej, a anoda pobiera elektrony z warstwy przewodzącej. Kolejnym etapem jest rekombinacja wywoływana przez oddziaływanie elektrostatyczne przyciągające elektrony i luki elektronowe, w trakcie której elektron przechodzi na niższy poziom energetyczny, emitując foton (światło).

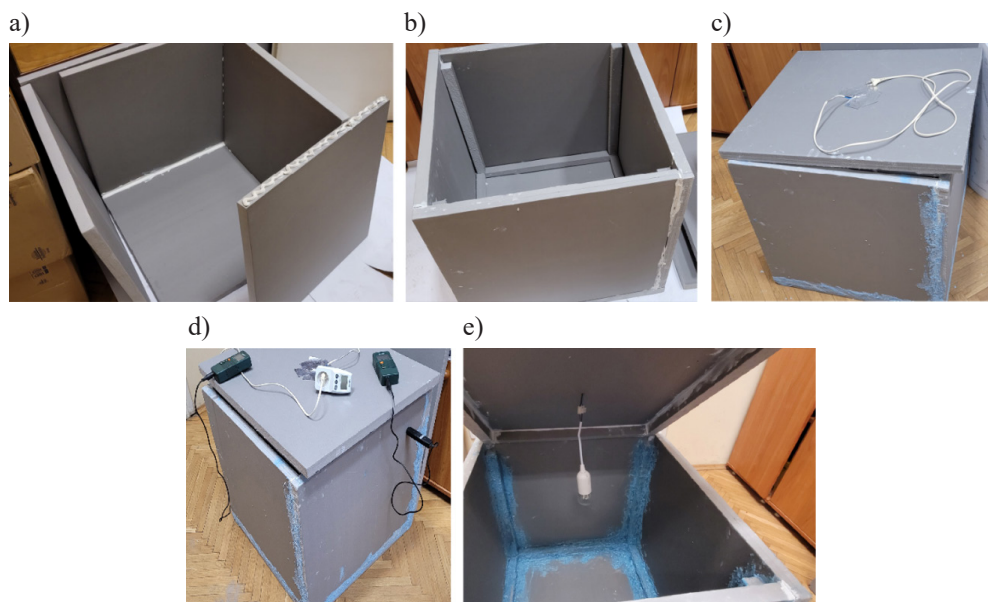
Zewnętrzna powierzchnia tradycyjnej żarówki może się nagrzać do wyższych temperatur (w granicach 93–260°C) niż powierzchnia żarówki (diody) LED (zazwyczaj 38–54°C) [8]. Powierzchnia tradycyjnej żarówki w trakcie normalnego użytkowania zazwyczaj osiąga około 46°C. Żarówki LED są zaprojektowane tak, aby pozostawały chłodne – ich radiatory lub obudowy odprowadzają wytwarzane ciepło [6].

3. OPIS STANOWISKA POMIAROWEGO

3.1. PROCES WYKONANIA STANOWISKA POMIAROWEGO

Stanowisko pomiarowe wykonano ze styrodurewych płyt Styropmin XPS 20 RF o grubości 30 mm. Jest to materiał wytworzony w procesie ekstruzji z granulki polistyrenowych, stosowany jako izolacja cieplna. Charakteryzuje go między innymi jednorodna, zamknięto-komórkowa struktura (powodująca zwiększoną odporność na uszkodzenia), odporność na działanie wilgoci oraz łatwość przycinania i montażu przyciętych płyt. Jego współczynnik przewodzenia ciepła wynosi maksymalnie 0,035 W/(m·K) [9].

Poniżej opisano postęp prac konstrukcyjnych przedstawiony na rysunku 1. Płyty styrodurewe zostały pocięte na kawałki o odpowiednich wymiarach, tak by umożliwić wykonanie komory wewnętrznej o wymiarach 55,2 cm × 55,2 cm × 55,2 cm. Następnie przygotowane ściany komory połączono ze sobą za pomocą kleju hybrydowego Soudal T-REX GOLD i usztywniono stanowisko na 24 godziny w celu pełnego utwardzenia kleju. Tak samo postąpiono z pokrywą komory pomiarowej. Klej ten utwardza się w wyniku reakcji z wilgocią z otoczenia, a jego pełne utwardzenie następuje po jednej dobie. Jest wykonany na bazie polimeru SMX®. Odporność termiczna kleju wynosi od –40°C do +90°C [10].



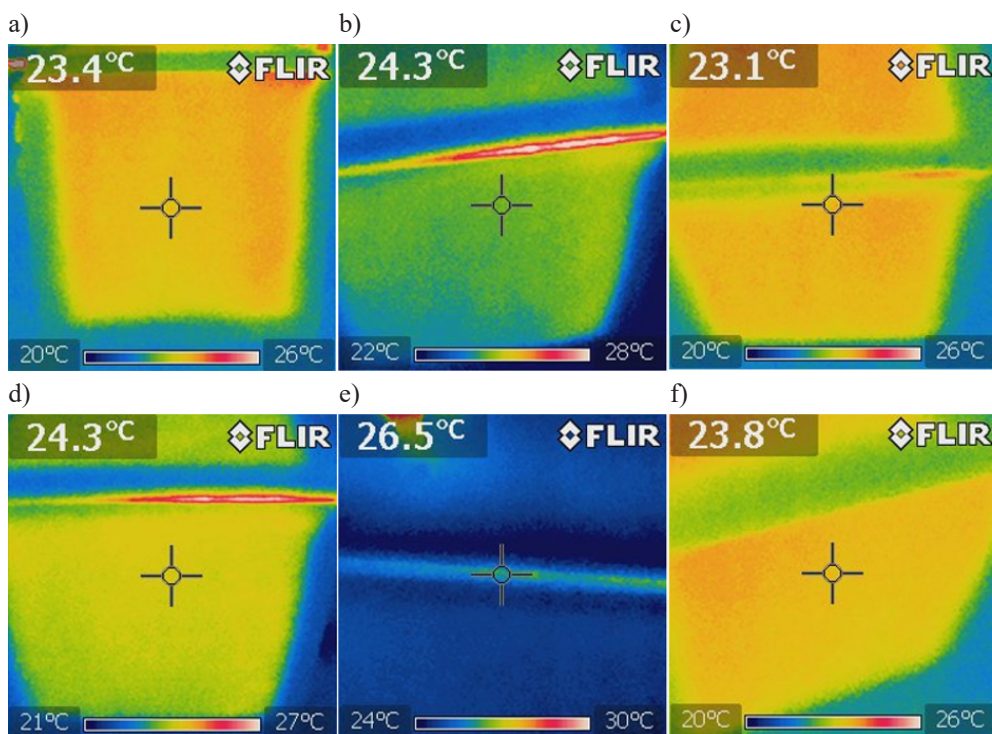
Rys. 1. Postęp prac konstrukcyjnych związanych z budową stanowiska pomiarowego:

- a) łączenie ze sobą płyt styrodurowych klejem hybrydowym Soudal T-REX GOLD;
- b) dopasowanie wymiarów styrodurowych prostopadłościanów użytych do uszczelnienia komory;
- c) komora po zamocowaniu przewodu zasilającego i uszczelnieniu klejem do styropianu TYTAN PROFESSIONAL;
- d) stanowisko pomiarowe z użytą aparaturą pomiarową;
- e) wnętrze komory pomiarowej podczas doświadczenia z żarówką tradycyjną o mocy 40 W

Następnie uszczelniono komorę, mocując wzdłuż wewnętrznych krawędzi styrodurowe prostopadłościany o kwadratowej podstawie o wymiarach $3\text{ cm} \times 3\text{ cm}$ oraz wysokości dopasowanej do miejsca ich przyklejenia. Zastosowano jednokomponentowy klej poliuretanowy TYTAN PROFESSIONAL przeznaczony do klejenia płyt styropianowych oraz między innymi parapetów, listew ozdobnych, płyt gipsowo-kartonowych, paneli ściennych, lekkich elementów dekoracyjnych lub kasetonów. Producent gwarantuje współczynnik przewodzenia ciepła wynoszący maksymalnie $0,036\text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$, a czas pełnego utwardzenia kleju wynosi jedną dobę [11].

Kolejnym etapem konstrukcji stanowiska pomiarowego było zamocowanie przewodu zasilającego żarówki i dwóch termohigrometrów RH210 EXTECH oraz podłączenie żarówki do miernika zużycia energii elektrycznej. Na koniec sprawdzono szczelność komory przez umieszczenie w niej suszarki do włosów na 10 minut i zmierzenie temperatury powierzchni komory.

Na rysunku 2 przedstawiono wyniki pomiarów temperatur zewnętrznych powierzchni komory wykonanych w celu sprawdzenia dokładności spasowania elementów komory. Jak widać na zdjęciach wykonanych kamerą termowizyjną Flir i7, najmniej ciepła ucieka wzdłuż krawędzi, co świadczy o skuteczności uszczelnienia łączeń płyt i braku mostków termicznych na styku sklejonych płyt styrodurowych. Więcej ciepła przedostaje się przez ściany sześcianu, co wynika z mniejszej grubości styroduru. Najbardziej nagrzewa się styrodur przy krawędzi łączącej komorę badawczą z jej pokrywą, jednak udało się znacząco zmniejszyć ten efekt dzięki równomiernemu obciążeniu pokrywy.



Rys. 2. Wyniki pomiarów temperatur zewnętrznych powierzchni komory podczas sprawdzenia dokładności spasowania elementów komory: a) widok komory pomiarowej od frontu; b) widok komory pomiarowej z prawej strony; c) widok komory pomiarowej z tyłu; d) widok komory pomiarowej z lewej strony; e) zbliżenie na szczelinę przy pokrywie; f) pomiar temperatury ścianki

3.2. ZASTOSOWANE URZĄDZENIE POMIAROWE

Stanowisko pomiarowe zostało wyposażone w dwa termohigrometry RH210 EXTECH, które mierzyły temperaturę oraz wilgotność powietrza w dolnej i górnej części komory. W tabeli 1 przedstawiono najważniejsze parametry zastosowanych termohigrometrów [12, 13].

Tabela 1. Zakres pomiarowy i dokładność pomiaru termohigrometru RH210 EXTECH

Zakres pomiaru temperatury	0–50°C
Dokładność pomiaru temperatury	±0,8°C
Zakres pomiaru wilgotności	10–95% RH
Dokładność pomiaru wilgotności	±3%

Źródło: [13]

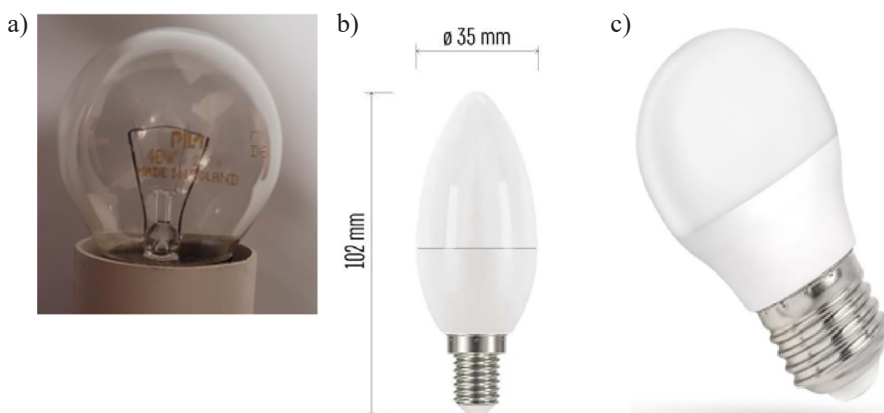
Do pomiarów temperatur powierzchni zastosowano kamerę termowizyjną Flir i7. Zakres temperatury pracy urządzenia wynosi od 0°C do $+50^{\circ}\text{C}$. Kamera może mierzyć temperaturę w zakresie od 20°C do 250°C z dokładnością wynoszącą $\pm 2\%$ lub 2°C – błąd pomiaru dla danej temperatury powierzchni to większa z dwóch tych wartości [14].

4. METODYKA POMIAROWA

Zbadano zmiany temperatury podczas doświadczeń z zastosowaniem trzech żarówek (rys. 3):

- żarówki tradycyjnej o mocy 40 W,
- żarówki LED Emos o mocy 6 W (odpowiednika tradycyjnej żarówki o mocy 40 W) [15, 16],
- żarówki LED o mocy 4 W (odpowiednika tradycyjnej żarówki o mocy 31 W) [17].

Najpierw zbadano przyrosty temperatur powietrza wewnątrz komory w trakcie doświadczenia z żarówką tradycyjną o mocy 40 W, a następnie podczas doświadczenia z użyciem jej odpowiednika, czyli żarówki LED Emos o mocy 6 W. Na końcu wykonano doświadczenie z użyciem żarówki LED o mocy 4 W, by porównać ją z żarówką LED o mocy 6 W.



Rys. 3. Zamontowane żarówki: a) żarówka tradycyjna o mocy 40 W;
b) żarówka LED EMOS o mocy 6 W; c) żarówka LED o mocy 4 W

Pomiary wewnątrz komory badawczej prowadzono przez godzinę, w trakcie której co minutę odczytywano następujące wartości:

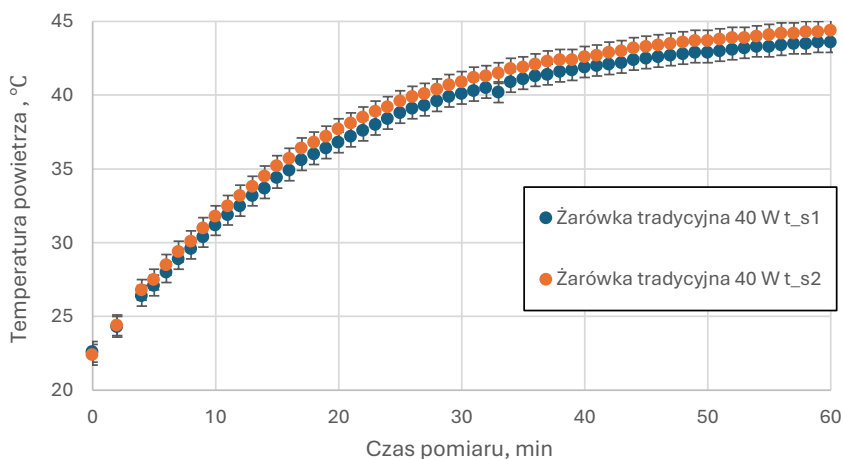
- temperaturę powietrza w dolnej i górnej części komory (termohigrometr 1 i 2),
- wilgotność względną powietrza w dolnej i górnej części komory,
- moc pobieraną przez badaną żarówkę.

Oprócz tego w trakcie trwania doświadczenia sprawdzano temperaturę zewnętrznej powierzchni komory w celu wykrycia ewentualnych nieszczelności, po ukończeniu pomiarów wyżej wymienionych parametrów zmierzono temperaturę powierzchni żarówek.

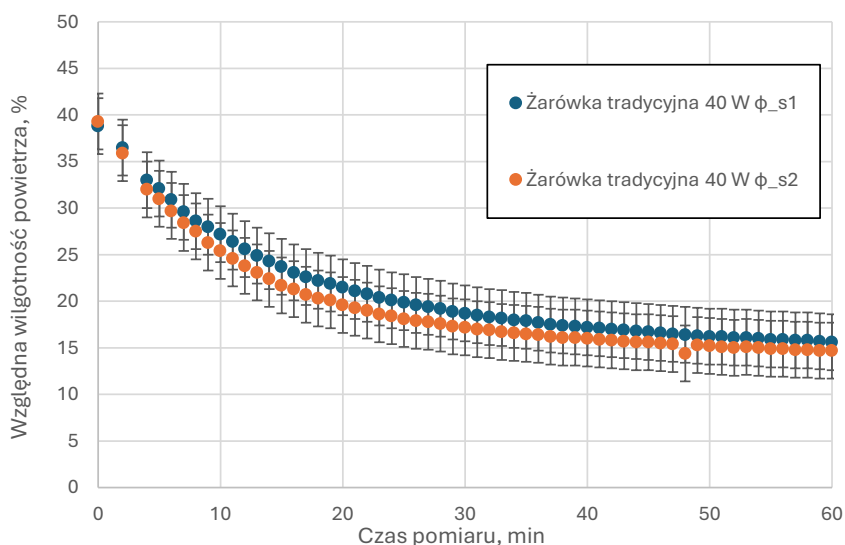
5. WYNIKI POMIARÓW

5.1. ŻARÓWKA TRADYCYJNA O MOCY 40 W

Na rysunkach 4 i 5 przedstawiono w formie graficznej wyniki pomiarów temperatury i wilgotności względnej powietrza uzyskane w doświadczeniu z żarówką tradycyjną o mocy 40 W.



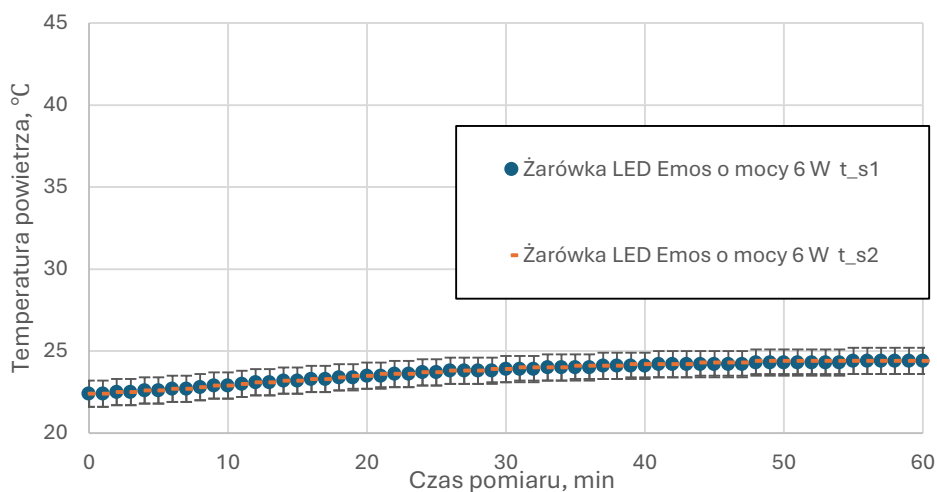
Rys. 4. Temperatura powietrza zmierzona termohigrometrami podczas doświadczenia z żarówką tradycyjną o mocy 40 W



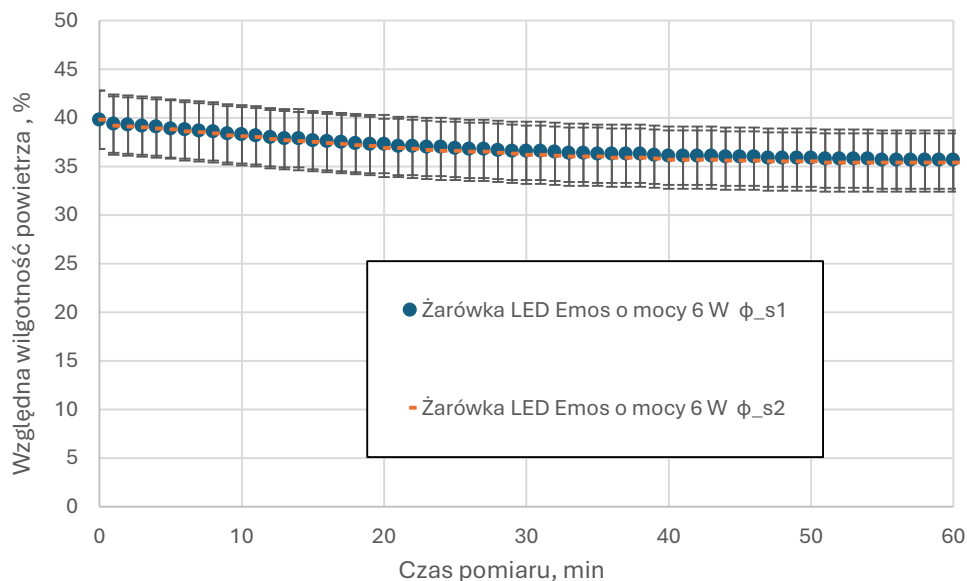
Rys. 5. Względna wilgotność powietrza zmierzona termohigrometrami podczas doświadczenia z żarówką tradycyjną o mocy 40 W

5.2. ŻARÓWKA LED EMOS O MOCY 6 W

Na rysunkach 6 i 7 przedstawiono w formie graficznej wyniki pomiarów temperatury i wilgotności względnej powietrza uzyskane w doświadczeniu z żarówką LED Emos o mocy 6 W.



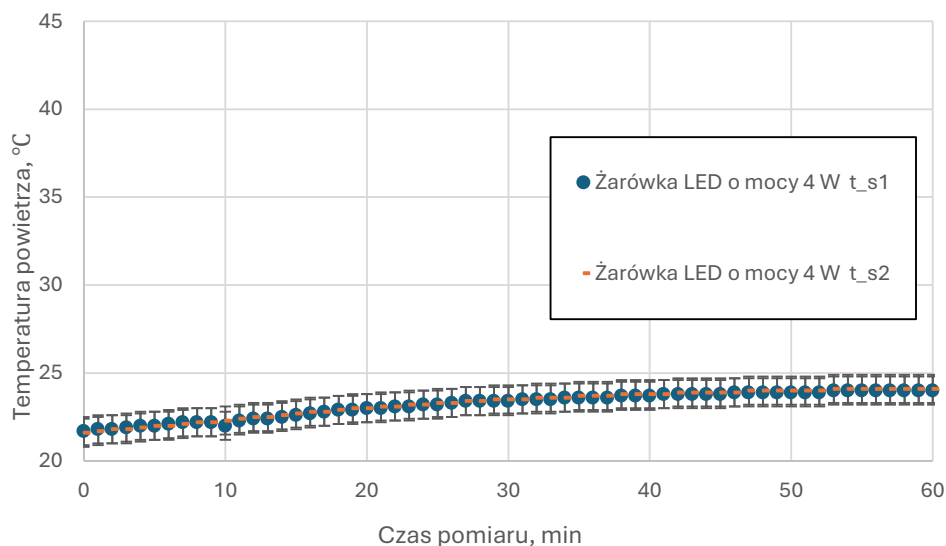
Rys. 6. Temperatura powietrza zmierzona termohigrometrami podczas doświadczenia z żarówką LED Emos o mocy 6 W



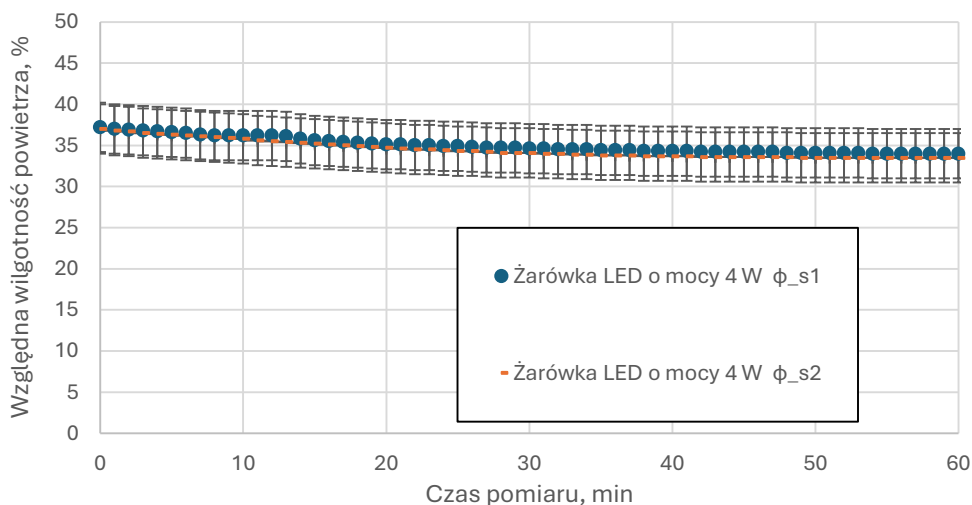
Rys. 7. Względna wilgotność powietrza zmierzona termohigrometrami podczas doświadczenia z żarówką LED Emos o mocy 6 W

5.3. ŻARÓWKI LED O MOCY 4 W

Na rysunkach 8 i 9 przedstawiono w formie graficznej wyniki pomiarów temperatury i wilgotności względnej powietrza uzyskane w doświadczeniu z żarówką LED o mocy 4 W.



Rys. 8. Temperatura powietrza zmierzona termohigrometrami podczas doświadczenia z żarówką LED o mocy 4 W



Rys. 9. Względna wilgotność powietrza zmierzona termohigrometrami podczas doświadczenia z żarówką LED o mocy 4 W

6. OPRACOWANIE WYNIKÓW

Zastosowano dwa termohigrometry, by umożliwić obliczenie średniej temperatury i wilgotności względnej panującej w komorze badawczej. Policzono pośredni błąd bezwzględny średniej temperatury powietrza i średniej wilgotności względnej powietrza. Metodykę obliczania błędu bezwzględnego pośredniego opisano poniżej.

$$T_{\text{średnia}} = \frac{T_{s1} + T_{s2}}{2} [^{\circ}\text{C}],$$

$$\Delta T_{\text{średnia}} = \left| \frac{\partial \left(\frac{T_{s1} + T_{s2}}{2} \right)}{\partial T_{s1}} \cdot \Delta T_{s1} \right| + \left| \frac{\partial \left(\frac{T_{s1} + T_{s2}}{2} \right)}{\partial T_{s2}} \cdot \Delta T_{s2} \right| = \left| \frac{1}{2} \cdot \Delta T_{s1} \right| + \left| \frac{1}{2} \cdot \Delta T_{s2} \right| [^{\circ}\text{C}],$$

$$\varphi_{\text{średnia}} = \frac{\varphi_{s1} + \varphi_{s2}}{2} [\%],$$

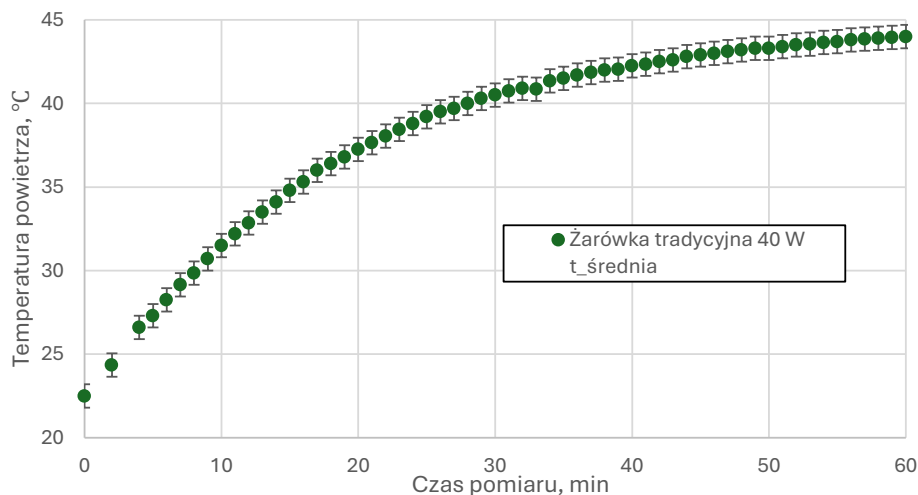
$$\Delta \varphi_{\text{średnia}} = \left| \frac{\partial \left(\frac{\varphi_{s1} + \varphi_{s2}}{2} \right)}{\partial \varphi_{s1}} \cdot \Delta \varphi_{s1} \right| + \left| \frac{\partial \left(\frac{\varphi_{s1} + \varphi_{s2}}{2} \right)}{\partial \varphi_{s2}} \cdot \Delta \varphi_{s2} \right| = \left| \frac{1}{2} \cdot \Delta \varphi_{s1} \right| + \left| \frac{1}{2} \cdot \Delta \varphi_{s2} \right| [\%].$$

gdzie: T_{s1} to wynik pomiaru temperatury na dolnym termohigrometrze, T_{s2} to wynik pomiaru temperatury na górnym termohigrometrze, φ_{s1} to wynik pomiaru wilgotności względnej na dolnym termohigrometrze, φ_{s2} to wynik pomiaru wilgotności względnej na górnym termohigrometrze, ΔT_{s1} to dokładność pomiaru temperatury na dolnym termohigrometrze, ΔT_{s2} to dokładność pomiaru temperatury na górnym termohigrometrze, $\Delta \varphi_{s1}$ to dokładność pomiaru wilgotności względnej na dolnym termohigrometrze, a $\Delta \varphi_{s2}$ to dokładność pomiaru wilgotności względnej na górnym termohigrometrze.

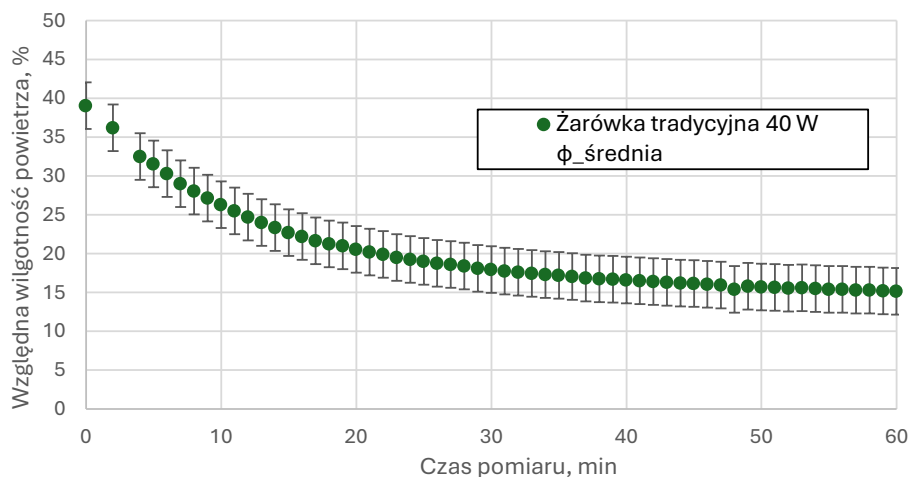
Wartości dokładności pomiaru są zawarte w tabeli 1. Widoczne na wykresach połączone z punktami czarne linie to błędy bezwzględne wynikające z parametrów zastosowanego termohigrometru.

6.1. ŻARÓWKA TRADYCYJNA O MOCY 40 W

Na rysunkach 10 i 11 przedstawiono w formie graficznej uśrednione wartości temperatury i wilgotności względnej powietrza uzyskane w doświadczeniu z żarówką tradycyjną o mocy 40 W.



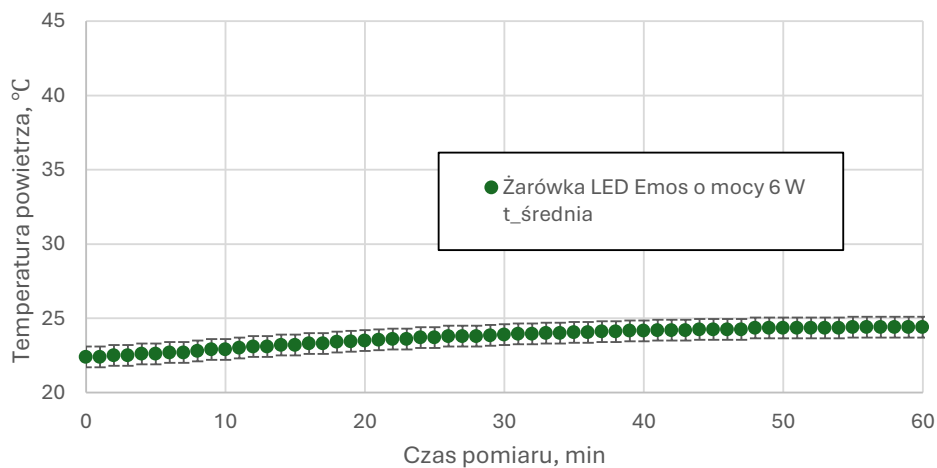
Rys. 10. Średnia temperatura powietrza termohigrometrami podczas doświadczenia z żarówką tradycyjną o mocy 40 W



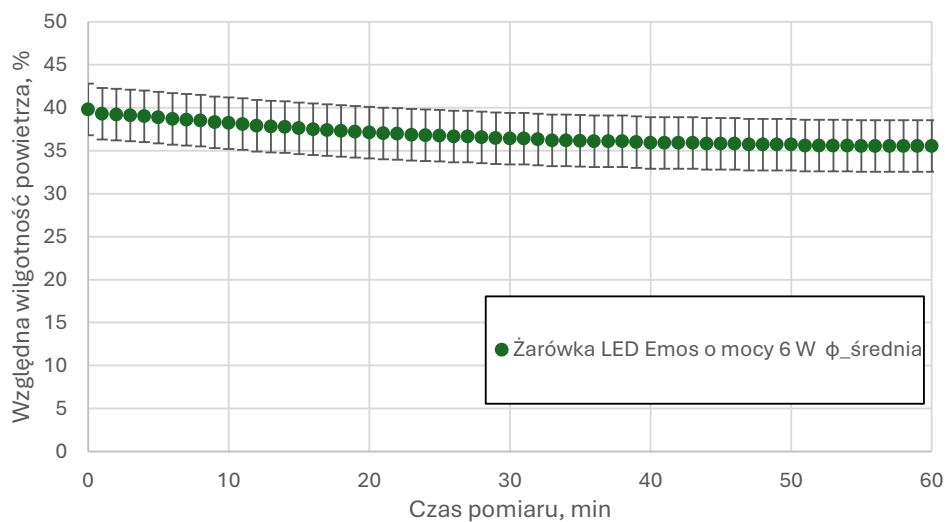
Rys. 11. Średnia względna wilgotność powietrza zmierzona termohigrometrami podczas doświadczenia z żarówką tradycyjną o mocy 40 W

6.2. ŻARÓWKA LED EMOS O MOCY 6 W

Na rysunkach 12 i 13 przedstawiono w formie graficznej uśrednione wartości temperatury i wilgotności względnej powietrza uzyskane w doświadczeniu z żarówką LED Emos o mocy 6 W.



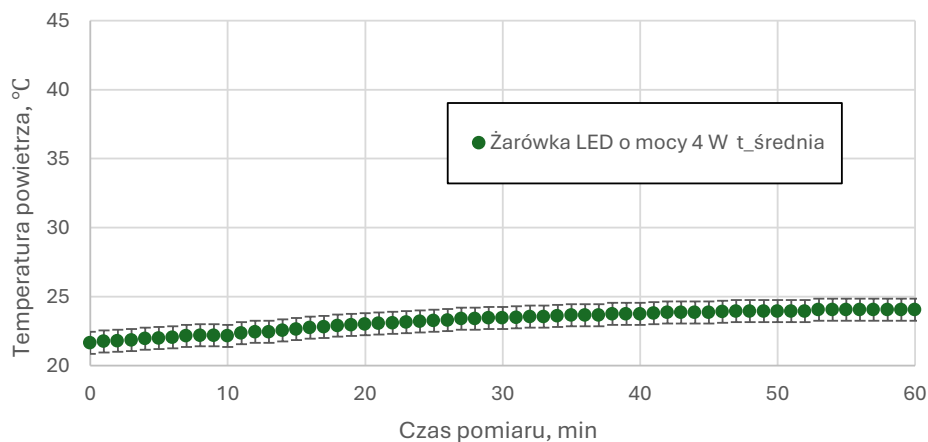
Rys. 12. Średnia temperatura powietrza zmierzona termohigrometrami podczas doświadczenia z żarówką LED Emos o mocy 6 W



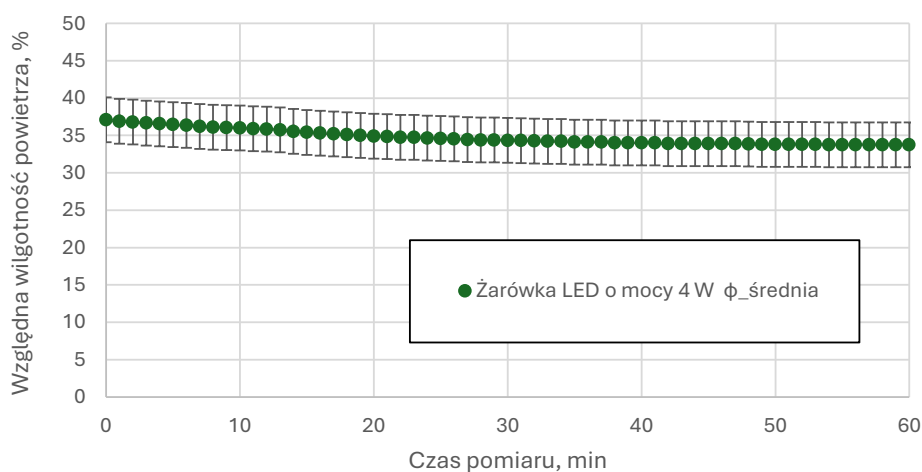
Rys. 13. Średnia względna wilgotność powietrza zmierzona termohigrometrami podczas doświadczenia z żarówką LED Emos o mocy 6 W

6.3. ŻARÓWKI LED O MOCY 4 W

Na rysunkach 14 i 15 przedstawiono w formie graficznej uśrednione wartości temperatury i wilgotności względnej powietrza uzyskane w doświadczeniu z żarówką LED o mocy 4 W.



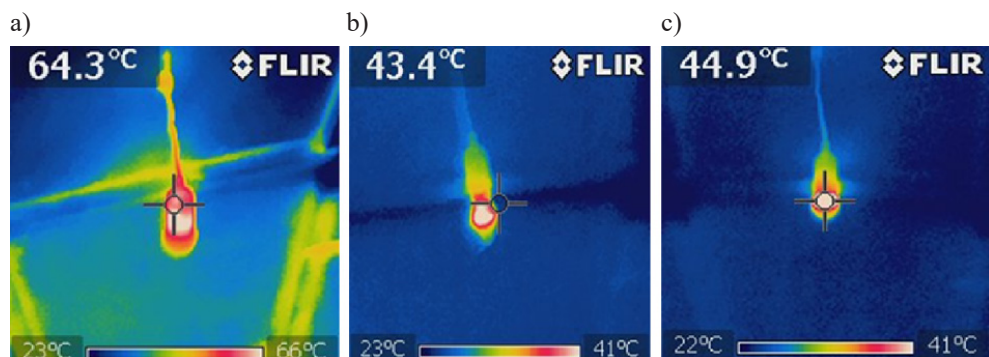
Rys. 14. Średnia temperatura powietrza zmierzona termohigrometrami podczas doświadczenia z żarówką LED o mocy 4 W



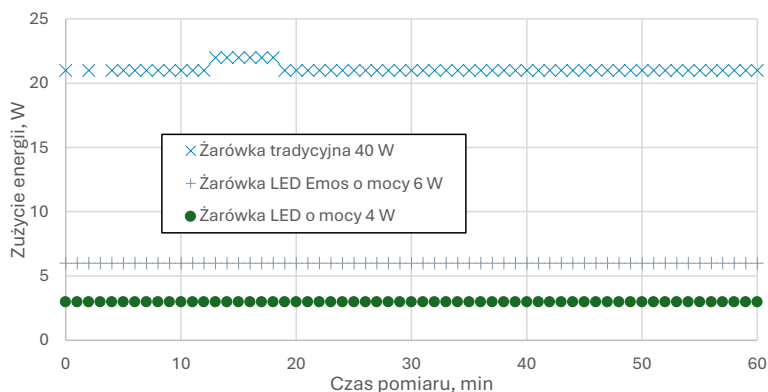
Rys. 15. Średnia względna wilgotność powietrza zmierzona termohigrometrami podczas doświadczenia z żarówką LED o mocy 4 W

6.4. PORÓWNANIE WYNIKÓW UZYSKANYCH W DOŚWIADCZENIACH

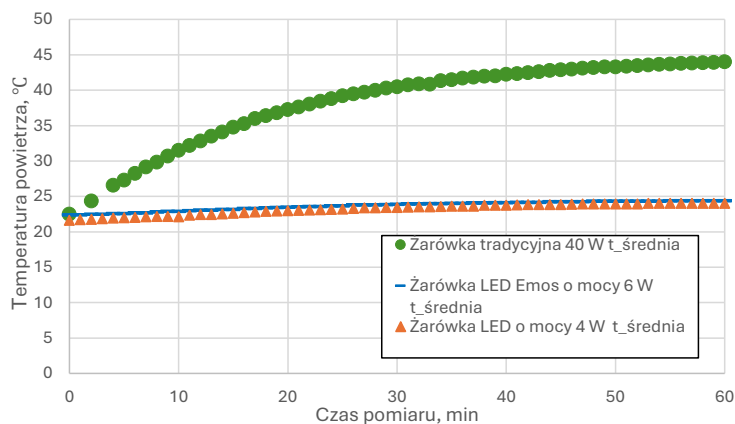
Na rysunkach 16–19 przedstawiono porównanie wyników uzyskanych w przeprowadzonych doświadczeniach. Żarówka tradycyjna o mocy 40 W w porównaniu z oboma użytymi w doświadczeniu żarówkami LED zużywała więcej energii elektrycznej, szybciej ogrzewała powietrze wewnątrz komory pomiarowej oraz szybciej zmniejszała wilgotność względną powietrza, a jej temperatura powierzchni po godzinnym pomiarze osiągnęła znaczącą większą wartość.



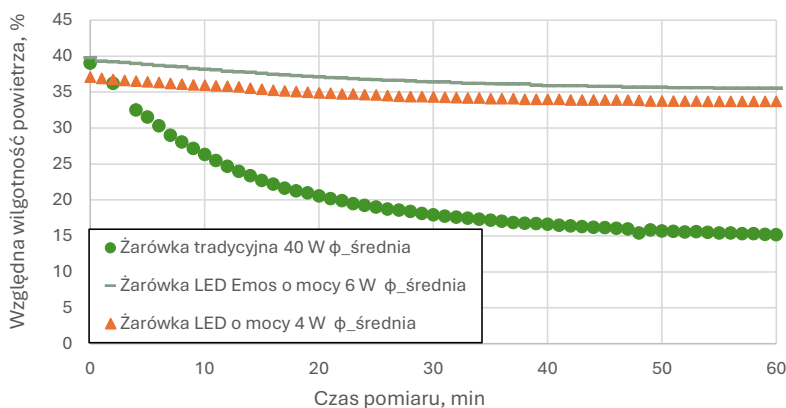
Rys. 16. Temperatury powierzchni żarówek po godzinnych pomiarze:
a) żarówka tradycyjna o mocy 40 W; b) żarówka LED EMOS o mocy 6 W; c) żarówka LED o mocy 4 W



Rys. 17. Porównanie zużycia energii elektrycznej



Rys. 18. Porównanie średnich temperatur powietrza



Rys. 19. Porównanie średnich wilgotności względnych powietrza

7. WNIOSKI

Pobór prądu przez odpowiednik żarówki tradycyjnej o mocy 40 W (żarówka LED Emos o mocy 6 W) jest o 71,43% mniejszy w porównaniu z żarówką tradycyjną o mocy 40 W. Żarówka LED o mocy 4 W pobierała 50% mniej prądu niż żarówka LED o mocy 6 W.

Końcowa maksymalna temperatura powierzchni żarówki tradycyjnej o mocy 40 W jest o 60,96% większa od końcowych maksymalnych temperatur powierzchni badanych żarówek LED.

Żarówka tradycyjna o mocy 40 W podgrzała powietrze w komorze pomiarowej od 22,50°C do 44,00°C (o 21,50°C). Zastosowane w doświadczeniu żarówki LED o mocach 6 W i 4 W w tym samym czasie zmieniły temperaturę powietrza odpowiednio o 2,00°C oraz 2,65°C.

Średnia wilgotność względna powietrza w komorze pomiarowej w trakcie doświadczenia z żarówką tradycyjną spadła o 23,90%, podczas gdy w trakcie doświadczeń z żarówkami LED spadła odpowiednio o 4,25% i 3,35%.

Zmiany wilgotności względnej w trakcie pomiarów z zastosowaniem żarówek LED niewiele różnią się od dokładności użytego termohigrometru RH210 EXTECH. Większy spadek wilgotności względnej uzyskany w serii pomiarowej z żarówką tradycyjną o mocy 40 W wynika ze wzrostu zawartości wilgoci w stanie nasycenia wraz ze wzrostem temperatury powietrza. Termohigrometr ma duży błąd pomiarowy, szczególnie przy takich niskich wilgotnościach, które wystąpiły w trakcie doświadczenia z żarówką tradycyjną o mocy 40 W. Mogło to wpływać na dokładność pomiarów. Stosowanie żarówek tradycyjnych o dużych mocach w małych, niewłaściwie wentylowanych pomieszczeniach może prowadzić do nadmiernego spadku wilgotności względnej powietrza, a co za tym idzie – dyskomfortu użytkowników.

Wyniki przeprowadzonych doświadczeń potwierdzają, że żarówki LED są efektywniejszym energetycznie źródłem światła, a ich stosowanie zmniejsza ryzyko poparzeń spowodowanych kontaktem z powierzchnią żarówki i pożarów wywołanych podgrzaniem niewłaściwie

składowanych materiałów łatwopalnych [18–20]. Żarówki LED w mniejszym stopniu wpływają na bilans ciepła oraz bilans energetyczny budynków.

Opisana w artykule komora pomiarowa służy do wyznaczania przyrostu temperatury powietrza wewnątrz komory, spowodowanego pracą umieszczonej w niej żarówki lub urządzenia elektrycznego. W celu wyznaczania zysków ciepła konieczna jest modyfikacja stanowiska. Długotrwała praca żarówki lub urządzenia elektrycznego w komorze może doprowadzić do nadmiernego wzrostu temperatury, powodując uszkodzenie urządzenia lub komory.

8. PODSUMOWANIE

Na efektywność energetyczną budynku i pomieszczeń istotny wpływ mają umieszczone w nich systemy oświetleniowe oraz urządzenia elektryczne. Muszą one spełniać wymagania zawarte w przepisach i normach, uwzględniających zarówno aspekty ekologiczne i ekonomiczne, jak i uwarunkowania geopolityczne.

Przeprowadzone doświadczenia potwierdziły, że w porównaniu z tradycyjnymi żarówkami żarówki LED cechują się większą sprawnością energetyczną i wywierają mniejszy wpływ na środowisko wewnętrzne. Szczególnie w przypadku dużych budynków może to umożliwiać znaczne oszczędności energii elektrycznej zużywanej na oświetlenie i chłodzenie pomieszczeń.

Dalszy rozwój planowanych przez autora badań będzie ukierunkowany na opracowanie komory pomiarowej z przepływem powietrza, pozwalającej na wyznaczanie zysków ciepła generowanych przez żarówki i urządzenia elektryczne.

LITERATURA

- [1] Pełech A., *Wentylacja i klimatyzacja: podstawy*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2013.
- [2] Malicki M., *Wentylacja i klimatyzacja*, Państwowe Wydawnictwo Naukowe, Warszawa 1974.
- [3] Nantka M.B., *Wentylacja z elementami klimatyzacji*, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2015.
- [4] *Dyrektywa Parlamentu Europejskiego i Rady (UE) 2024/1275 z dnia 24 kwietnia 2024 r. w sprawie charakterystyki energetycznej budynków*, <http://data.europa.eu/eli/dir/2024/1275/oj> [dostęp: 12.02.2025].
- [5] *Dyrektywa Parlamentu Europejskiego i Rady 2009/125/WE z dnia 21 października 2009 r. ustanawiająca ogólne zasady ustalania wymogów dotyczących ekoprojektu dla produktów związanych z energią*, <http://data.europa.eu/eli/dir/2009/125/2012-12-04> [dostęp: 12.02.2025].
- [6] *Nowe etykiety energetyczne – działania edukacyjno-informacyjne*, Ministerstwo Klimatu i Środowiska, <https://www.gov.pl/web/klimat/nowe-etykiety-energetyczne> [dostęp: 12.02.2025].

- [7] *What is Light Bulb Heat Temperature Chart? How Hot can a Light Bulb be?*, Leds-Master, <https://www.ledsmaster.com/knowledge/parameters/what-is-light-bulb-heat-temperature-chart/> [dostęp: 12.02.2025].
- [8] *How hot does a light bulb get?*, Quora, <https://www.quora.com/How-hot-does-a-light-bulb-get> [dostęp: 12.02.2025].
- [9] *Deklaracja własności użytkowych. DWU Nr XPS/3/8/23*, Styropmin, <https://www.styropmin.pl/wp-content/uploads/2023/09/XPS-PRO-20-RF.pdf> [dostęp: 12.02.2025].
- [10] *Kleje montażowe T-Rex Gold*, Soudal, <https://www.soudal.pl/diy/t-rex-gold-klej-montazowy> [dostęp: 12.02.2025].
- [11] *Klej do styropianu w wersji pistoletowej*, Tytan Professional, <https://tytan.com/pl/produkt/pianokleje/klej-do-styropianu/> [dostęp: 12.02.2025].
- [12] *RH210 EXTECH*, TME Electronic Components, <https://www.tme.eu/pl/details/rh210/termohigrometry/extech/> [dostęp: 12.02.2025].
- [13] *User Guide Hygro-Thermometer Model RH210*, ITM Instruments, <https://www.itm.com/pdfs/cache/www.itm.com/rh210/manual/rh210-manual.pdf?srsId=AfmBOoPlfq816K1kgq2eB2Pri1mZ4DfTrGdE2IDRWUeFuMbLUCCWmLc> [dostęp: 12.02.2025].
- [14] *Kamera przemysłowa Flir i7 do diagnostyki cieplnej*, SpyOptic, <https://spy-optic.pl/termowizyjne-kamery-przemyslowe/385-kamera-przemyslowa-flir-i7-do-diagnostyki-cieplnej.html> [dostęp: 12.02.2025].
- [15] *Żarówka LED świeczka E14 6W 865 470lm Emos ZQ3222 zimna*, Alkan, <https://alkan.pl/sklep/zarowka-led-swieczka-e14-6w-865-470lm-emos-5169/> [dostęp: 12.02.2025].
- [16] *Żarówka LED Classic świeczka / E14 / 5 W (40 W) / 470 lm / zimna biel*, EMOS, <https://www.emos.pl/zarowka-led-classic-swieczka-e14-5-w-40-w-470-lm-zimna-biel?srsId=AfmBOoqYBjTjpiE-1NpXWWqSoKYcoJ6GW59Cb9uuPXlqk7XPpV-s1nxL1> [dostęp: 12.02.2025].
- [17] *Żarówka LED 4W kulka 6000K E27 WOJ+13033 SPECTRUMLED*, Shilo, <https://shilo-sklep.pl/pl/p/ZAROWKA-LED-4W-KULKA-6000K-E27-WOJ-13033-SPECTRUMLED/1968> [dostęp: 12.02.2025].
- [18] *Pożar – niebezpieczeństwo, które często nadchodzi zimą*, Bezpieczeństwo BHP, 30.12.2019, https://bezpieczenstwo-bhp.pl/blog/blog-o-bezpieczenstwie-bhp/pozar-niebezpieczenstwo-ktore-czesto-nadchodzi-zima?srsId=AfmBOoooQE0v4iR1Utf-dA2xd06_47vpK5b-NMLd8UuaYVE__wv12nr9H [dostęp: 12.02.2025].
- [19] *Czy oświetlenie LED stwarza ryzyko pożaru? Oto, jak tego uniknąć dzięki lampom LED Mester*, Mester – LED Lighting Expert, <https://www.mesterleds.com/pl/news/are-led-lights-a-fire-risk-heres-how-to-avoid-it-with-mester-led-lights/> [dostęp: 12.02.2025].
- [20] *Pożary od elektrycznych źródeł światła*, Przegląd Pożarniczy, <https://www.ppoz.pl/czytelnia/rozpoznawanie-zagrozen/Pozary-od-elektrycznych-zrodel-swiatla/idn:841> [dostęp: 12.02.2025].

Maria Franczyk*

BIODRUK 3D: REWOLUCJA W MEDYCYNIE – MOŻLIWOŚCI, WYZWANIA I PRZYSZŁOŚĆ ZASTOSOWAŃ

Współczesna medycyna stoi u progu rewolucji technologicznej, która może znacząco wydłużyć życie człowieka i poprawić jego jakość. Jednym z najważniejszych kierunków tego rozwoju jest biodruk 3D, który stanowi przełomową technologię w dziedzinie medycyny regeneracyjnej, ponieważ umożliwia tworzenie trójwymiarowych struktur biologicznych dzięki precyzyjnemu nakładaniu komórek i biomateriałów. Proces ten pozwala na odtwarzanie funkcji i struktury naturalnych tkanek, co otwiera nowe perspektywy w leczeniu uszkodzeń oraz chorób narządów. W niniejszym artykule omówione zostaną mechanizmy biodruku 3D, jego kluczowe zastosowania w medycynie oraz wyzwania związane z implementacją tej technologii w praktyce klinicznej. Analiza obejmie zarówno aspekty technologiczne, jak i regulacyjne, co pozwoli zrozumieć potencjał oraz ograniczenia biodruku 3D w kontekście współczesnej medycyny.

3D BIOPRINTING: REVOLUTION IN MEDICINE – POSSIBILITIES, CHALLENGES, AND THE FUTURE OF APPLICATIONS

Contemporary medicine stands on the brink of a technological revolution that could significantly extend human life and improve its quality. One of the most important avenues of this development is 3D bioprinting – a breakthrough technology in regenerative medicine that enables the creation of three-dimensional biological structures through the precise deposition of cells and biomaterials. This process allows for the replication of the functions and structures of natural tissues, opening up new perspectives in the treatment of injuries and organ diseases. In this article, the mechanisms of 3D bioprinting, its key applications in medicine, and the challenges associated with implementing this technology in clinical practice will be discussed. The analysis will cover both technological and regulatory aspects, aiming to understand the potential and limitations of 3D bioprinting in the context of modern medicine.

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

1. WSTĘP

Biodruk 3D to jedna z najbardziej innowacyjnych technologii, która dynamicznie zmienia oblicze medycyny. Dzięki możliwości precyzyjnego nakładania komórek i biomateriałów w formie warstwowej biodruk 3D pozwala na tworzenie struktur, które wiernie imitują naturalne tkanki i narządy. Proces ten opiera się na wykorzystaniu specjalistycznych bioatramentów – mieszanin komórek, biopolimerów i czynników wzrostu – które dzięki zaawansowanym drukarkom 3D są formowane w precyzyjnie kontrolowane modele tkankowe.

Aktualne badania wskazują, że technologia biodruku 3D ma potencjał nie tylko w tworzeniu implantów czy prostych struktur tkankowych, ale również w opracowywaniu pełnowartościowych narządów gotowych do transplantacji. Rozwój tej technologii wymaga jednak ściślejszej współpracy interdyscyplinarnej – inżynierów oraz biologów – którzy wspólnie pracują nad składem nowych bioatramentów i optymalizacją parametrów drukowania [1].

Integracja systemów informatycznych, w tym algorytmów sztucznej inteligencji, umożliwia nie tylko precyzyjne sterowanie procesem drukowania, ale także symulację i optymalizację wyników, co znacząco przyspiesza badania przedkliniczne oraz wdrażanie nowych rozwiązań terapeutycznych [2]. Biodruk 3D otwiera zatem nowe perspektywy w personalizacji terapii medycznych – już dziś możliwe jest projektowanie struktur dostosowanych do indywidualnych potrzeb pacjenta, co przekłada się na zwiększenie skuteczności leczenia i poprawę jakości życia.

2. TECHNOLOGIE STOSOWANE W BIODRUKU 3D

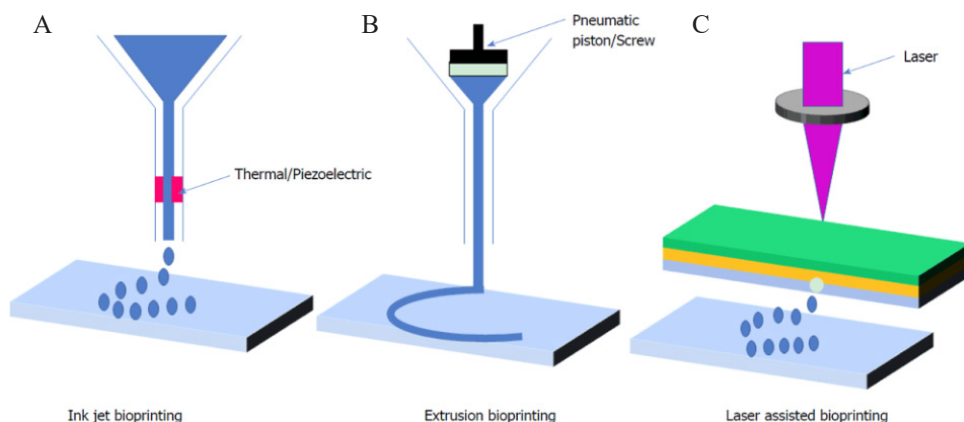
Biodruk 3D jest wykorzystywany w różnych obszarach medycyny, a jego rozwój wspierają technologie umożliwiające tworzenie precyzyjnych struktur komórkowych. Najczęściej stosowane metody biodruku to biodruk strumieniowy, ekstruzyjny oraz wspomagany laserem. Każda z nich ma swoje specyficzne zastosowania, zalety oraz ograniczenia, co wpływa na wybór odpowiedniej technologii w zależności od danego projektu.

Biodruk strumieniowy (*inkjet bioprinting*) jest jedną z najbardziej precyzyjnych metod, polegającą na dokładnym dozowaniu bioatramentu, który jest wyrzucany przez mikrodysze w postaci kropli na podłoże. Technologia ta umożliwia tworzenie szczegółowych struktur, takich jak naczynia krwionośne, oraz precyzyjne rozmieszczanie komórek w drukowanej tkance. Biodruk strumieniowy jest często wykorzystywany do drukowania cienkowarstwowych struktur, ponieważ zapewnia wysoką rozdzielczość przy minimalnym zużyciu materiałów. Wymaga jednak stosowania bioatramentów o niskiej lepkości, co może wpływać na stabilność wydrukowanych struktur, zwłaszcza w bardziej złożonych formach.

Biodruk ekstruzyjny (*extrusion bioprinting*) jest bardziej wszechstronny od biodruku strumieniowego, ponieważ umożliwia drukowanie materiałów o wyższej lepkości, takich jak hydrożele z dużą zawartością komórek. Ta technologia pozwala na tworzenie bardziej masywnych struktur, takich jak fragmenty kości czy tkanka mięśniowa, które są wykorzystywane w inżynierii tkankowej. Mimo że biodruk ekstruzyjny ma niższą rozdzielczość niż strumieniowy, charakteryzuje się większą elastycznością w doborze materiałów, co sprawia, że jest preferowany w bardziej wymagających zastosowaniach.

Biodruk wspomagany laserem (*laser-assisted bioprinting*, LAB) to jedna z nowszych metod, która umożliwia tworzenie precyzyjnych wzorców komórkowych przy użyciu wiązki lasera. Proces drukowania odbywa się bez dysz, co pozwala na lepszą kontrolę nad formowaniem struktur. Dzięki tej technologii możliwe jest uzyskiwanie bardzo szczegółowych i skomplikowanych form, które znajdują zastosowanie m.in. w regeneracji tkanek oraz produkcji implantów. Jednak LAB jest kosztowną i skomplikowaną metodą, co ogranicza jej powszechne wykorzystanie w porównaniu z innymi technologiami biodruku [3].

Na rysunku 1 przedstawiono schemat trzech głównych technologii biodruku: (A) biodruk strumieniowy (*inkjet bioprinting*), w którym bioatrament jest rozpylany w postaci kropli przez mikrodyszę; (B) biodruk ekstruzyjny (*extrusion bioprinting*), bazujący na wytłaczaniu materiału z dyszy za pomocą tłoka pneumatycznego lub śruby; oraz (C) biodruk wspomagany laserem (*laser-assisted bioprinting*), gdzie wiązka lasera umożliwia precyzyjne osadzanie komórek i materiału bez konieczności stosowania dyszy.



Rys. 1. Trzy technologie biodruku 3D. Objasnienia w tekście

Źródło: [2]

3. WYZWANIA I PERSPEKTYWY BIODRUKU 3D W MEDYCYNIE

Pomimo ogromnego potencjału biodruk 3D napotyka szereg wyzwań, które ograniczają jego szerokie zastosowanie w praktyce klinicznej. Jednym z głównych problemów jest zapewnienie odpowiedniej żywotności oraz funkcjonalności drukowanych tkanek. W praktyce oznacza to konieczność optymalizacji bioatramentów tak, aby drukowane struktury nie tylko zachowały stabilność mechaniczną, ale także wspierały naturalne procesy regeneracyjne na poziomie komórkowym.

Kolejnym wyzwaniem są bariery regulacyjne oraz kwestie etyczne. Wdrożenie nowych technologii medycznych wymaga opracowania szczegółowych standardów bezpieczeństwa, co często wiąże się z długotrwałymi badaniami klinicznymi oraz licznymi konsultacjami interdyscyplinarnymi [4]. Złożoność procesów biologicznych oraz potrzeba precyzyjnej kontroli nad procesem drukowania sprawiają, że wdrożenie biodruku w codziennej praktyce medycznej wymaga dalszych badań i inwestycji w rozwój technologiczny.

W nadchodzących latach naukowcy będą się koncentrować na rozwoju nowych bioatramentów, które nie tylko poprawią jakość drukowanych tkanek, ale również umożliwią ich szybsze zespolenie z tkankami pacjenta. Współczesne badania wskazują, że zastosowanie symulacji komputerowych do optymalizacji parametrów drukowania może znacząco przyczynić się do poprawy efektywności procesów biodruku. Jednocześnie rozwój technologii informatycznych i sztucznej inteligencji umożliwi tworzenie bardziej precyzyjnych modeli drukowania, co może wpłynąć na dalszą automatyzację i standaryzację tego procesu [5].

4. TESTOWANIE LEKÓW I BADAŃ KLINICZNYCH

Biodruk 3D umożliwia tworzenie zaawansowanych modeli tkankowych, które wiernie odzwierciedlają strukturę i funkcje ludzkich tkanek. Dzięki temu modele te stają się niezwykle użyteczne w procesie testowania nowych leków oraz w badaniach przedklinicznych. Modele te pozwalają na przeprowadzenie badań w warunkach bardziej zbliżonych do naturalnego środowiska organizmu niż tradycyjne modele dwuwymiarowe.

Modele tkankowe uzyskane metodą biodruku 3D umożliwiają analizę odpowiedzi komórek na działanie substancji leczniczych w czasie rzeczywistym. Przykładowo dzięki precyzyjnie odwzorowanemu mikrośrodołowi badacze mogą obserwować, w jaki sposób leki wpływają na procesy proliferacji, różnicowania czy apoptozy komórek. Takie podejście zwiększa trafność ocen skuteczności leków, co przekłada się na szybsze i bardziej efektywne opracowywanie terapii.

Dodatkowo zastosowanie modeli 3D w badaniach nad nowymi lekami pozwala na symulację różnych stanów patologicznych, w tym chorób nowotworowych czy zaburzeń metabolicznych. Modele te mogą być dostosowywane do specyficznych cech pacjentów, co umożliwia rozwój spersonalizowanych terapii. W praktyce oznacza to, że dzięki badaniom prowadzonym na modelach tkankowych można przewidzieć reakcję organizmu na daną terapię, a także zidentyfikować możliwe skutki uboczne wcześniej niż w przypadku tradycyjnych testów *in vitro* czy *in vivo*.

Kolejnym istotnym aspektem jest zmniejszenie zależności od testów na zwierzętach. Modele tkankowe pozwalają na przeprowadzenie szeroko zakrojonych badań nad bezpieczeństwem i skutecznością leków, co w dłuższej perspektywie może ograniczyć liczbę eksperymentów na modelach zwierzęcych, a tym samym przyczynić się do bardziej etycznego prowadzenia badań przedklinicznych [6, 7].

5. PRZEŁOMOWE OSIĄGNIĘCIA BIODRUKU NARZĄDÓW

W październiku 2015 roku powstało konsorcjum BIONIC, którego zadaniem była realizacja projektu „Biodrukowanie 3D rusztowań z wykorzystaniem żywych wysp trzustkowych lub komórek produkujących insulinę w celu stworzenia bionicznej trzustki”. Projekt ten został sfinansowany przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju w ramach programu „Profilaktyka i leczenie chorób cywilizacyjnych”. Celem jest opracowanie metody biodruku 3D, która pozwoli na stworzenie funkcjonalnej trzustki z wykorzystaniem komórek pacjenta, co może zrewolucjonizować leczenie cukrzycy.

W marcu 2019 roku naukowcy z Fundacji Badań i Rozwoju Nauki w Warszawie wydrukowali pierwszą na świecie bioniczną trzustkę wraz z naczyniami krwionośnymi. To przełomowe

osiągnięcie otwiera nowe możliwości w leczeniu cukrzycy i innych chorób związanych z funkcjonowaniem trzustki. Profesor Michał Wszola, lider konsorcjum BIONIC, zapowiedział, że pierwsze przeszczepy bionicznej trzustki u ludzi mogą odbyć się w 2026 roku. Opracowana przez niego bioniczna trzustka, powstająca w technice biodruku 3D, ma przywrócić zdolność organizmu do regulowania poziomu cukru we krwi i zrewolucjonizować leczenie cukrzycy [8].

Na rysunku 2 zaprezentowano kolejne etapy tworzenia bionicznej trzustki: od pobrania materiału (biopsja) i namnażania komórek macierzystych, przez ich przekształcenie w komórki produkujące insulinę i glukagon, aż po sam proces biodruku oraz wytworzenie gotowej trzustki. Następnie przedstawiono fazę oceny funkcjonalności i bezpieczeństwa, a na końcu – transplantację bionicznego narządu do pacjenta.



Rys. 2. Projekt biodrukowania 3D bionicznej trzustki

Źródło: [8]

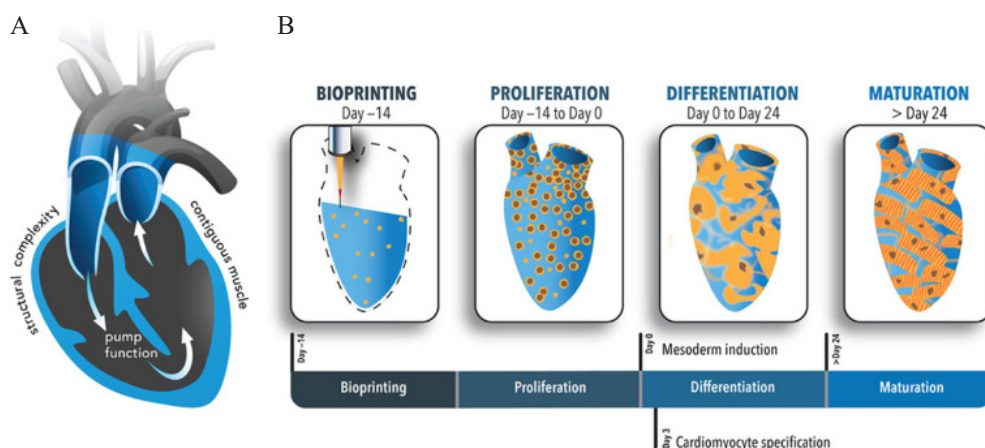
Wątroba jest jednym z najczęściej przeszczepianych narządów, jednak liczba dostępnych organów jest zdecydowanie mniejsza niż liczba potrzebujących biorców. Alternatywą dla tradycyjnych transplantacji może stać się biodruk 3D, nad którym naukowcy pracują już od kilku lat. W 2016 roku badacze z University of California w San Diego opracowali wydrukowaną w technologii 3D tkankę przypominającą pod względem budowy i funkcji wątrobę.

Na tym etapie wykorzystywano ją głównie do badań farmaceutycznych. Kilka lat później firma Organovo stworzyła fragmenty tkanki wątroby, które w 2018 roku z powodzeniem przeszczepiono myszom – tkanki zachowały swoją funkcję przez co najmniej miesiąc. Testy na ludziach miały rozpocząć się w 2020 roku, jednak wciąż nie zostały przeprowadzone.

Nowatorskie podejście zaprezentowali również naukowcy z University of São Paulo, którzy w 2019 roku na bazie komórek krwi pacjenta stworzyli miniaturowe wersje wątroby. Te organoidy były zdolne do podjęcia podstawowych funkcji takich jak magazynowanie składników odżywczych czy produkcja żółci, a ich pełne wykształcenie zajmowało około 90 dni [4].

Zespół badawczy z University of Minnesota opracował innowacyjny biotusz, który umożliwił stworzenie funkcjonalnego serca za pomocą technologii biodruku 3D. Wykorzystując pluripotencjalne komórki macierzyste, naukowcy byli w stanie wydrukować trójwymiarową replikę aorty z bardziej złożoną strukturą przedsionków i komór oraz z grubszymi ścianami komorowymi niż wcześniej osiągnięte. Zespół z Minnesoty zastosował wysoce proliferacyjne komórki macierzyste, które różnicowały się w kardiomiocyty bezpośrednio w miejscu docelowym, zrastając się z tkanką mięśnia sercowego i przejmując jej funkcje. Kluczowym elementem tego procesu było opracowanie biotuszu, który nie tylko wspierał żywotność komórek, ale także umożliwiał ich proliferację i różnicowanie w kardiomiocyty. Dzięki modyfikacji składu macierzy pozakomórkowej (ECM, *Extracellular Matrix*) naukowcy stworzyli biotusz zdolny do precyzyjnego nanoszenia komórek z zachowaniem wysokiej dokładności przestrzennej. Po 14 dniach od wydruku 90% objętości struktury zostało wypełnione komórkami macierzystymi, a w ciągu sześciu tygodni zaobserwowano minimalną śmiertelność komórek wewnątrz modelu aortalnego, co wskazuje na ich dobrą kondycję. Dodatkowo serce wykazywało stałą aktywność elektromechaniczną przez cały okres badania, co potwierdza jego funkcjonalność jako pompy [9].

Na ilustracji rysunku 3 w części (A) przedstawiono schemat serca z uwzględnieniem jego złożonej budowy oraz funkcji pompującej, natomiast w części (B) ukazano kolejne etapy procesu: od biodruku i namnażania komórek macierzystych (proliferacja), poprzez ich różnicowanie w kardiomiocyty, aż do dojrzewania struktury.



Rys. 3. Schemat różnicowania się komórek w tkanki mięśnia sercowego do 24 dnia od wydruku

Źródło: [9]

Harmonogram czasowy obrazuje poszczególne fazy – od przygotowania do biodruku (dzień –14) po pełną funkcjonalność modelu serca (powyżej 24. dnia). Za dzień 0 przyjęto proces indukcji mezodermy, podczas którego komórki macierzyste są chemicznie „programowane”, żeby mogły stać się komórkami mezodermalnymi, a następnie w procesie różnicowania przekształcać się w konkretne typy komórek.

6. PERSPEKTYWY I PRZYSZŁOŚĆ BIODRUKU 3D

Rozwój technologii biodruku 3D otwiera nowe, fascynujące perspektywy w medycynie. Obecne badania wskazują, że w najbliższych latach biodruk może stać się kluczowym narzędziem w regeneracji narządów i tkanek, umożliwiając tworzenie pełnowartościowych struktur, które będą mogły zastąpić uszkodzone lub chore elementy ludzkiego ciała [10].

W miarę postępu technologicznego zwiększa się precyzja druku, co pozwala na coraz lepsze odwzorowanie złożonych struktur anatomicznych. Innowacyjne bioatramenty, opracowywane z myślą o specyficznych potrzebach poszczególnych typów tkanek, przyczyniają się do poprawy żywotności drukowanych struktur i ich funkcjonalności. Dzięki temu procesy takie jak zrastanie z tkankami pacjenta oraz przyspieszenie regeneracji stają się bardziej efektywne.

Kolejnym ważnym aspektem jest integracja biodruku 3D z technologiami informatycznymi, w tym z rozwiązaniami opartymi na sztucznej inteligencji. Wykorzystanie algorytmów uczenia maszynowego do optymalizacji parametrów drukowania może znacząco poprawić jakość uzyskiwanych modeli tkankowych, a także umożliwić ich masową personalizację. Takie podejście otwiera drogę do stworzenia spersonalizowanych terapii, gdzie każdy pacjent otrzymuje implanty czy tkanki idealnie dopasowane do jego indywidualnej anatomii.

Perspektywy biodruku 3D obejmują także rozwój druku całych organów. Choć wciąż pozostaje to wyzwaniem, badania nad drukowaniem skomplikowanych struktur takich jak serce, wątroba czy nerki dynamicznie się rozwijają. W miarę postępu badań technologia ta może stać się rewolucyjnym rozwiązaniem w transplantologii, ponieważ będzie eliminować problem niedoboru dawców oraz skracać czas oczekiwania na przeszczep [11, 12].

7. WNIOSKI I KIERUNKI DAJSZYCH BADAŃ

Biodruk 3D stanowi rewolucyjny krok w dziedzinie medycyny regeneracyjnej oraz inżynierii tkankowej. Dotychczasowe badania wskazują, że technologia ta ma potencjał, by zmienić podejście do leczenia uszkodzonych tkanek i narządów.

Kluczowe wnioski z dotychczasowych badań można podsumować następująco.

- 1. Optymalizacja bioatramentów:** aby drukowane tkanki mogły pełnić funkcje naturalnych struktur, konieczne jest dalsze opracowywanie kompozycji bioatramentów, które zapewnią zarówno stabilność mechaniczną, jak i odpowiednie warunki do wzrostu komórek.

2. **Integracja z systemami informatycznymi:** wykorzystanie algorytmów sztucznej inteligencji oraz symulacji komputerowych już teraz przynosi efekty w postaci bardziej precyzyjnego sterowania procesem drukowania, a w przyszłości ta integracja prawdopodobnie umożliwi całkowitą automatyzację produkcji personalizowanych implantów i tkanek.
3. **Standaryzacja i regulacje:** wdrożenie technologii biodruku do rutynowej praktyki medycznej wymaga opracowania szczegółowych norm oraz procedur bezpieczeństwa, co wymusza ścisłą współpracę naukowców, klinicystów oraz instytucji regulacyjnych.
4. **Badania przedkliniczne i kliniczne:** modele tkankowe wykorzystywane w badaniach przedklinicznych stają się coraz bardziej zaawansowane, jednak aby biodruk mógł znaleźć zastosowanie w terapii, konieczne jest przeprowadzenie szeroko zakrojonych badań klinicznych, które potwierdzą skuteczność i bezpieczeństwo drukowanych struktur.

W perspektywie najbliższych lat naukowcy skupią się na dalszej optymalizacji parametrów drukowania, rozwoju nowych materiałów oraz integracji biodruku z innymi zaawansowanymi technologiami medycznymi. Dzięki interdyscyplinarnym badaniom prawdopodobnie już wkrótce biodruk 3D stanie się standardowym narzędziem w regeneracji tkanek, umożliwiającym tworzenie spersonalizowanych terapii i redukującym potrzebę przeprowadzania kosztownych i czasochłonnych testów klinicznych.

Biodruk 3D otwiera przed medycyną zupełnie nowe możliwości – od tworzenia modeli do testowania leków, przez regenerację tkanek, aż po przyszłościowe rozwiązania w transplanologii. Wykorzystanie tego potencjału wymaga jednak dalszych badań, inwestycji w rozwój technologiczny oraz międzynarodowej współpracy naukowej, które mogą przyczynić się do radykalnej zmiany podejścia do leczenia pacjentów.

Podziękowania

Publikacja została zrealizowana w ramach wygłoszenia referatu na 65. Studenckiej Konferencji Barbórkowej AGH, który zajął III miejsce w XVI sekcji. Serdeczne wyrazy wdzięczności za wsparcie merytoryczne kieruję w stronę Pana dr. inż. Mariusza Niekurzaka, opiekuna koła naukowego „Menadżer Produkcji”.

LITERATURA

- [1] Przychodniak M., *Biodruk 3D w pigulce – wprowadzenie*, <https://centrumdruku3d.pl/biodruk-3d-w-pigulce-wprowadzenie/> [dostęp: 22.02.2025].
- [2] Shweta Anil Kumar, Delgado M., Mendez V.E., Joddar B., *Applications of stem cells and bioprinting for potential treatment of diabetes*, World Journal of Stem Cells, vol. 11(1), 2019, s. 13–32, <https://doi.org/10.4252/wjsc.v11.i1.13>.
- [3] Przychodniak M., *Biodruk 3D w pigulce – technologia ekstruzji*, <https://centrumdruku3d.pl/biodruk-3d-w-pigulce-technologia-ekstruzji/> [dostęp: 22.02.2025].
- [4] *Drukowane w 3D organy/części ciała: najbardziej obiecujące projekty*, <https://3d.edu.pl/drukowane-w-3d-organy-czesci-ciala-najbardziej-obiecujace-projekty/> [dostęp: 22.02.2025].

- [5] Pan Ch.-Ch., Bruyas A., Yang Y.P., *Bioprinting for tissue engineering and regenerative medicine*, Material Matters, vol. 11(2), 2016, 49–55.
- [6] Kornacka J., *Biodruk w medycynie – część II*, <https://pacjentwbadaniach.abm.gov.pl/pwb/aktualnosci/aktualne-wydarzenia-i-i/2506,Biodruk-w-medycynie-czesc-II.html?search=542677434> [dostęp: 20.02.2025].
- [7] Ciemny K., *Dlaczego medycyna potrzebuje druku 3D?*, Medical Robotics Reports, vol. 6, 2017, s. 71–77, https://wm.pb.edu.pl/telematyka-lab/wp-content/uploads/sites/11/2020/04/Dlaczego_medycyna_potrzebuje_druku_3D.pdf [dostęp: 20.02.2025].
- [8] *Biodrukowanie 3D bionicznej trzustki – Fundacja*, https://fundacijabirn.pl/projekt-biodrukowanie-3d-bionicznej-trzustki/?utm_ [dostęp: 20.02.2025].
- [9] Hanaphy P., *University of Minnesota researchers use 3D bioprinting to create beating human heart*, <https://3dprintingindustry.com/news/university-of-minnesota-researchers-use-3d-bioprinting-to-create-beating-human-heart-173210/> [dostęp: 23.02.2025].
- [10] Rybka J., *Co przyniesie nam życie? Biodruk 3D*, <https://uniwersyteckie.pl/nauka/co-przyniesie-nam-zycie-biodruk-3d> [dostęp: 23.02.2025].
- [11] *Perspektywy rozwoju medycyny w kierunku biodruku 3D tkanek*, <http://www.expert-monitor.pl/perspektywy-rozwoju-medycyny-w-kierunku-biodruku-3d-kanek/> [dostęp: 25.02.2025].
- [12] Gągała U., Jarmoszewicz K., *Drukowana przyszłość transplantologii, czyli jak urzeczywistniła się fantastyka naukowa*, <https://www.jwp.pl/drukowana-przyszlosc-transplantologii-czyli-jak-urzeczywistnila-sie-fantastyka-naukowa/> [dostęp: 25.02.2025].

Anna Golak*

COMPARISON OF EUROPEAN UNION COUNTRIES IN TERMS OF EDUCATIONAL AND TECHNOLOGICAL COMPETENCIES OF THEIR SOCIETIES

This study focuses on comparing European Union countries in terms of the educational and technological competencies of their societies. The analysis incorporates a broad set of variables that characterize various aspects of education and its impact on socio-economic development. An effort has been made to go beyond traditional indicators by including aspects particularly relevant in a rapidly changing world. The study employs multidimensional analysis methods (linear ordering and cluster analysis) to identify similarities and differences in the educational and technological structures of EU societies. The findings reveal groups of countries with similar profiles of educational and technological competencies, as well as highlight top-performing countries that excel in these areas, allowing for a ranking-based assessment. This approach provides a comprehensive perspective on education and its role in shaping societies, offering practical insights for educational policymaking in the context of contemporary global challenges.

PORÓWNANIE PAŃSTW UNII EUROPEJSKIEJ POD WZGLĘDEM KOMPETENCJI EDUKACYJNYCH I TECHNOLOGICZNYCH ICH SPOŁECZEŃSTW

Celem niniejszego opracowania jest porównanie krajów Unii Europejskiej pod względem poziomu kompetencji edukacyjnych i technologicznych ich społeczeństw. Analiza obejmuje szeroki zestaw zmiennych, które odzwierciedlają różnorodne aspekty systemów edukacyjnych, oraz ich wpływ na rozwój społeczno-gospodarczy. Podjęto próbę wyjścia poza tradycyjne wskaźniki, uwzględniając aspekty szczególnie istotne w dynamicznie zmieniającym się świecie. W badaniu zastosowano metody analizy wielowymiarowej (porządkowanie liniowe i analizę skupień), aby zidentyfikować podobieństwa i różnice w strukturach edukacyjnych i technologicznych społeczeństw UE. Wyniki wskazują na istnienie grupy państw o zbliżonych profilach kompetencji edukacyjnych i technologicznych oraz wyróżniają kraje najlepiej radzące sobie w tych obszarach. Takie podejście pozwala na kompleksową ocenę pozycji poszczególnych państw oraz dostarcza cennych wskazówek, które mogą wspierać tworzenie skutecznej polityki edukacyjnej w obliczu współczesnych wyzwań globalnych.

* AGH University of Krakow, Faculty of Management, AGH Student's Research Group Econometrics.

1. INTRODUCTION

In an era defined by globalization and rapid technological advancements, education systems play a pivotal role in shaping the competitiveness and innovative capacity of nations. For instance, research indicates that productivity and employee compensation tend to be higher in countries with a better-educated workforce [1]. Not only does education enhance human capital, but it also fosters innovation by enabling the creation of new products, techniques, and processes that drive long-term development. Additionally, it facilitates the absorption and implementation of advanced technologies, ensuring that nations remain competitive in an evolving global economy [2]. This underscores that education is not solely about achieving high test scores; it also encompasses a society's capacity to understand complex processes, adapt to changing realities, and engage in continuous learning.

The diversity of educational models across the globe reflects varying strategies for preparing societies to meet the challenges of the modern world. Within the European Union, the concept of a unified system remains aspirational due to diverse historical, cultural, and economic contexts. Therefore, given the EU's open labour market and commitment to balanced economic development, the question of which education system best promotes professional success and adaptability becomes especially relevant. This necessitates an exploration of which systems provide individuals with the greatest opportunities for prosperity and contribute most effectively to societal advancement.

Existing literature already offers valuable insights into educational performance across the EU. For example, one analysis explored the impact of lifelong learning on the economic development of European countries by using cluster analysis and linear regression. The results indicated that developed countries formed separate clusters, distinct from transition and southeastern European countries, with Luxembourg exhibiting a unique profile. Moreover, the analysis confirmed a positive correlation between lifelong learning, GDP per capita, employment rates, and net salary index [3]. Another work concentrated on measuring the achievement of the "Europe 2020" strategy's goals in education in EU-28 countries between 2010 and 2014, using the Hellwig's linear ordering method and identifying countries with the best and worst outcomes. Sweden, Finland, Austria, and Denmark achieved the highest level of goal implementation in both years, while Romania, Greece, Spain, Bulgaria, Malta, and Italy were in the group with the lowest level of implementation [4]. Attempts were also made to compare the effectiveness of education systems using composite indicators and data envelopment analysis (DEA), enabling the identification of benchmarks and areas for improvement. The study by M. Markowska, D. Strahl and A. Sokołowski [5] employed the simple additive weighting (SAW) method with equal weights and the DEA method, which assigned individual weights to each country. According to the results of this study, the highest-rated countries were Sweden, Denmark, and Finland, while the least efficient were Slovakia, Italy, Croatia, Bulgaria, Greece and Romania. Finally, an article by E. Roszko-Wójtowicz and M. M. Grzelak [6] compared education systems in EU countries in 2014 using the Hellwig's method and diagnostic variables assigned to five areas: funding, primary education, participation in the education system, higher education, and the risk of exclusion. The ranking revealed the effectiveness and quality of education systems across the EU – Denmark, Luxembourg, and Sweden held the top positions, Poland was ranked 11th, indicating

a moderately good education system and Italy, Bulgaria and Romania were at the bottom of the ranking.

These studies provide valuable insights, however, they often either touch upon slightly different issues or approach the analysis in a somewhat different manner than is expected in this article. For example, some focus on only specific aspects of education, such as lifelong learning, while others assess overall quality of education systems using broad economic indicators. Therefore, despite the wealth of existing literature, research gap persists regarding a comprehensive assessment of EU education systems that considers a spectrum of competencies – both educational and technological – crucial for functioning in today’s dynamically evolving world. This paper aims to fill this gap by providing a holistic comparison of EU countries in terms of the educational and technological competencies of their societies, using multivariate statistical methods – linear ordering and cluster analysis. This approach offers a more nuanced understanding of education’s impact on societal functioning, providing practical guidance for shaping educational policies in the face of contemporary global challenges.

The paper is structured as follows: Section 2 outlines the quantitative methods employed, namely linear ordering and cluster analysis. Section 3 presents the data, as well as key results obtained from the application of the quantitative methods. Section 4 provides a discussion of the results, comparing them with existing literature to highlight the novel insights gained. Finally, Section 5 concludes by summarizing the main findings and discussing their implications for the educational and technological progress of the EU.

2. METHODOLOGY

A comprehensive assessment of educational and technological competencies requires the use of robust statistical methods. Applying quantitative techniques enables a structured comparison between countries. In this study, linear ordering and cluster analysis are employed to categorize and rank EU countries based on key educational and technological indicators. These methods help identify patterns and disparities across nations, offering a comprehensive evaluation of their relative positions.

2.1. LINEAR ORDERING

Linear ordering, using Hellwig’s method [7], enables to create a ranking of objects (e.g., EU countries) based on a synthetic development indicator that combines multiple variables. The Hellwig’s method involves the following key steps:

- A set of relevant variables ($X_z = \{X_1, X_2, \dots, X_m\}$) that describe the objects is chosen. These variables are divided into two categories: stimulants (where higher values are desirable) or destimulants (where lower values are desirable).
- Destimulants are transformed into stimulants to ensure that all variables have a consistent direction of impact on the overall assessment. A formula used for this transformation is:

$$z_{ij}(s) = -\left(z_{ij}(d)\right),$$

where $z_{ij}(s)$ is the transformed stimulant and $z_{ij}(d)$ is the original destimulant.

- To ensure comparability, the diagnostic variables are standardized. The method of feature standardization using classical measures was applied [8]. Classical standardization aims to obtain a standard deviation of variables equal to 1 and an arithmetic mean equal to 0 by employing the formula:

$$Z_{ij} = \frac{X_{ij} - \overline{X_j}}{s_j},$$

where X_{ij} is the value of the j -th variable for the i -th object, $\overline{X_j}$ is the arithmetic mean of the j -th variable, and s_j is the standard deviation of the j -th variable.

- A development pattern is created, representing an abstract object with ideal characteristics. The coordinates of this pattern Z_{0j} are determined as follows: $Z_{0j} = \max(Z_{ij})$.
- The taxonomic distance (Euclidean distance) between each object and the development pattern is calculated using the formula:

$$D_i = \sqrt{\sum_{j=1}^m (z_{0j} - z_{ij})^2}.$$

- A synthetic measure of development d_i is computed for each object using the formula:

$$d_i = 1 - \frac{D_i}{C_0},$$

where $C_0 = \bar{D} + 2S_D$ with $\bar{D}$ being the average distance and S_D the standard deviation of the distances.

- The objects are ranked based on the decreasing values of the indicator, with higher values indicating a more favourable situation.

2.2. CLUSTER ANALYSIS

Cluster analysis, specifically Ward's method, is used to classify objects (e.g., countries) into groups based on a set of selected characteristics. The goal is to ensure that objects within a group are as similar as possible to each other, while the groups themselves are as distinct as possible.

Ward's method is a hierarchical agglomerative method of cluster analysis. This means that it starts by treating each object as a separate cluster and iteratively merges the nearest clusters until all objects are combined into one large cluster. Ward's method uses analysis of variance (ANOVA) to assess the distance between clusters. In each iteration, the algorithm merges the two clusters that cause the minimum increase in the within-group sum of squares of deviations (ESS). ESS is calculated as the sum of the squares of the distances of each object from the centroid (mean) of its cluster [5]. In other words, Ward's method minimizes variance within clusters.

The increase in ESS is calculated as follows:

$$\Delta ESS_{ij} = ESS_{ij} - ESS_i - ESS_j,$$

where ΔESS_{ij} is the increase in ESS after merging clusters, ESS_{ij} is the ESS for the new cluster formed after merging and ESS_i, ESS_j are ESS for clusters i and j , respectively. In each iteration the algorithm connects the two clusters for which ΔESS_{ij} is the smallest.

The results of cluster analysis using Ward's method are presented in the form of a dendrogram, which visualizes the hierarchical structure of the clusters and the order of their merging.

3. DATASET AND RESULTS

3.1. DATASET

In the first stage of the study, a preliminary substantive and formal analysis was conducted for a selected set of diagnostic variables describing the level of educational and technological competencies in societies. Since this phenomenon cannot be directly measured, an appropriate selection of variables was made to represent it from different perspectives. The data was obtained from Eurostat reports and the OECD database, with values corresponding to the year 2022.

To ensure the reliability of the analysis, a collinearity assessment was performed (it is assumed that the level of correlation between variables cannot be greater than 0.9) and as a result, eight diagnostic variables were selected (Table 1). Due to the common issue of strong positive asymmetry in selected diagnostic features, the values were trimmed to the range defined by the upper and lower whiskers, i.e., $Q_1 - 1.5 \cdot (Q_3 - Q_1)$ and $Q_3 + 1.5 \cdot (Q_3 - Q_1)$, to limit extreme values [9].

Table 1. Diagnostic variables used in the study

Variable	Unit	Type
Average number of foreign languages learned per student at the upper secondary level	number	stimulant
Percentage of people with basic and above-basic digital skills in the population	percent	stimulant
Number of higher education graduates per 1000 inhabitants	number	stimulant
Percentage of people leaving education and training early	percent	destimulant
Percentage of employed individuals aged 15–39 with higher education	percent	stimulant
Average PISA test score assessing the competencies of 15-year-old students	number	stimulant
Percentage of people aged 18–64 participating in education or training in the last 4 weeks	percent	stimulant
Percentage of ICT specialists in total employment	percent	stimulant

Table 2 presents the descriptive statistics for the diagnostic variables used in the study, including measures of central tendency (mean, median), dispersion (standard deviation), and distribution shape (skewness, kurtosis).

Table 2. Descriptive statistics for the diagnostic variables used in the study

Variable	Min	Median	Max	Skewness	Kurtosis	Mean	Sd
Average number of languages	0.80	1.50	2.30	0.09	−0.39	1.48	0.37
Digital skills	27.73	58.95	82.70	−0.13	−0.12	57.63	12.65
Completed higher education	53.20	76.20	115.80	0.55	−0.57	80.62	17.26
Early school leaving	2.00	7.70	16.60	0.40	−0.10	8.20	3.30
Employment after graduation	77.20	87.90	91.60	−0.74	−0.45	86.41	3.90
Average PISA score	459.00	478.33	504.00	0.37	0.58	482.51	9.52
Lifelong learning	7.70	18.90	33.20	0.57	−0.60	19.67	7.07
ICT specialists	2.50	4.50	7.70	0.60	−0.56	4.94	1.42

The analysed variables exhibit notable divergence in their statistical properties. The data show significant differences across countries, particularly in digital skills, higher education attainment, and lifelong learning participation. The skewness values suggest that most variables have relatively symmetrical distributions, though some, such as employment after graduation and ICT specialists, exhibit moderate asymmetry. Obtained values of kurtosis remain close to zero, showing that the distributions do not significantly deviate from normality. The standard deviations indicate varying degrees of dispersion, with higher education attainment and digital skills showing the greatest variability.

3.2. EMPIRICAL STUDY

In the first phase of this empirical study, linear ordering using Hellwig’s method was conducted, adhering to the methodological steps outlined in Section 2.1. The results are presented in Table 3.

Table 3. Ranking of EU-27 countries obtained using the Hellwig's method in 2022

Ranking	Country	Hellwig	Ranking	Country	Hellwig
1	Finland	0.652	15	Cyprus	0.266
2	Ireland	0.618	16	Lithuania	0.252
3	Sweden	0.513	17	Croatia	0.251
4	Netherlands	0.477	18	Slovakia	0.230
5	Estonia	0.470	19	Malta	0.211
6	Belgium	0.459	20	Portugal	0.194
7	France	0.406	21	Spain	0.176
8	Poland	0.393	22	Germany	0.170
9	Denmark	0.383	23	Hungary	0.168
10	Austria	0.375	24	Bulgaria	0.143
11	Slovenia	0.373	25	Italy	0.141
12	Luxembourg	0.356	26	Greece	0.103
13	Latvia	0.310	27	Romania	0.003
14	Czechia	0.292			

Additionally, based on the ordered values of the development indicator, the objects were grouped according to the level of educational and technological competencies into typological groups. The limits of the variable intervals are determined as follows [10]:

- Group I (very good situation): objects for which $d_i \geq \bar{d} + s_d$,
- Group II (above average situation): objects for which $\bar{d} + s_d > d_i \geq \bar{d}$,
- Group III (average situation): objects for which $\bar{d} > d_i \geq \bar{d} - s_d$,
- Group IV (insufficient situation): objects for which $d_i < \bar{d} - s_d$,

where d_i is the synthetic development indicator for the i -th object, $\bar{d}$ is the arithmetic mean of the development indicator and s_d is the standard deviation of the development indicator.

The results of the grouping are presented in Figure 1.

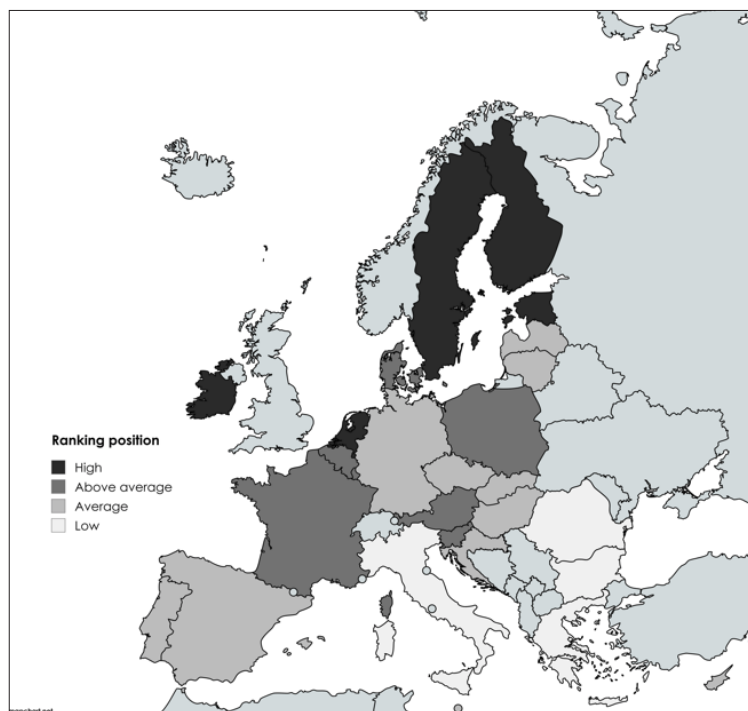


Fig. 1. Classification of EU-27 countries by the synthetic development indicator in 2022

The ranking of countries reveals significant disparities in the development of education and technology across nations. Finland ranks at the top with the highest score (0.652), indicating an exceptionally strong position in terms of both educational quality and technological capabilities. Finland has long been recognized as a global leader in innovation and education, with its education system serving as a model for many other countries [11].

Following Finland are Ireland, Sweden, and the Netherlands, highlighting their robust performance in education and technology. These countries are characterized by well-developed educational infrastructures, high technological skill levels among their populations, and strong research and development sectors.

In the second group, countries like Belgium, France, Poland, and Denmark show above-average scores, reflecting a solid yet slightly less advanced performance compared to the leaders. These nations offer their citizens strong educational and technological foundations, though there is still room for further progress and modernization.

Countries such as Latvia, Czechia, Cyprus, and Lithuania fall into the “average” category, indicating a moderate level of educational and technological development. While these nations may not be global leaders, they still provide stable conditions for the growth of these sectors. However, there are areas in need of investment and further improvement to enhance their competitiveness.

On the lower end of the ranking, countries like Bulgaria, Italy, Greece, and Romania appear, reflecting the need for greater investment in education and technological innovation. These countries experience more significant disparities in access to modern technologies and the quality of their education systems, which may affect their long-term competitiveness in the global arena.

In the next phase of this empirical study, cluster analysis was conducted following the algorithm outlined in Section 2.2, using Ward's method. The results are presented in the form of a dendrogram in Figure 2.

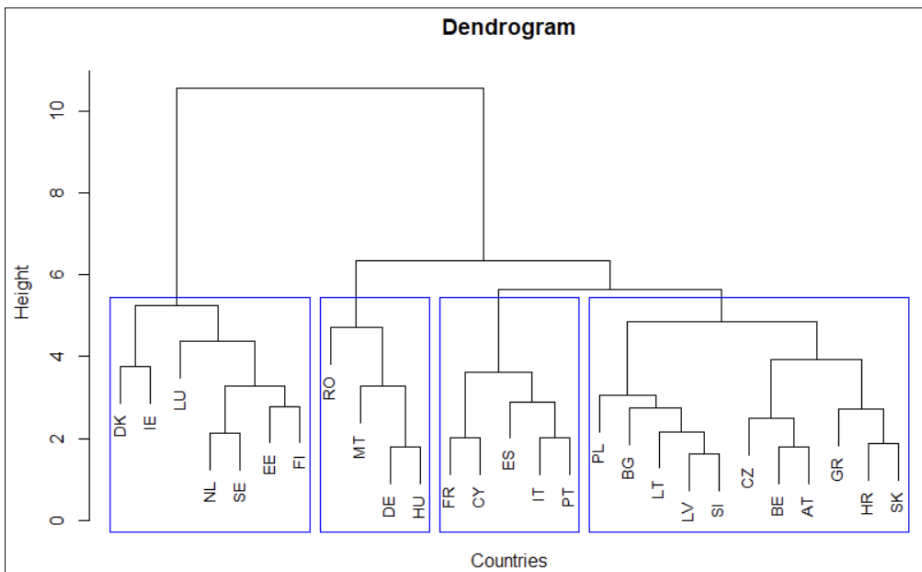


Fig. 2. Dendrogram of hierarchical cluster analysis of EU-28 countries (Ward's method)

Based on the analysis of the dendrogram (Fig. 2) a division of countries into four groups was chosen, as illustrated in Figure 3:

- Group 1 consists mainly of Central and Eastern European countries, including the Baltic states (Latvia, Lithuania), Balkan countries (Croatia, Greece, Slovenia), and Central European nations (Poland, Czechia, Slovakia, Austria). Additionally, Belgium and Bulgaria are part of this group. This is the largest and most diverse cluster in the classification.
- Group 2 is composed primarily of Northern European countries, including Denmark, Estonia, Ireland, the Netherlands, Finland, Sweden, and Luxembourg. These nations are recognized as leaders in education quality, digital skills, and innovation.
- Group 3 includes Germany, Hungary, Malta, and Romania. These countries ranked relatively low in the previous linear ordering ranking.
- Group 4 consists of Southern European countries, including Spain, France, Italy, Cyprus, and Portugal.

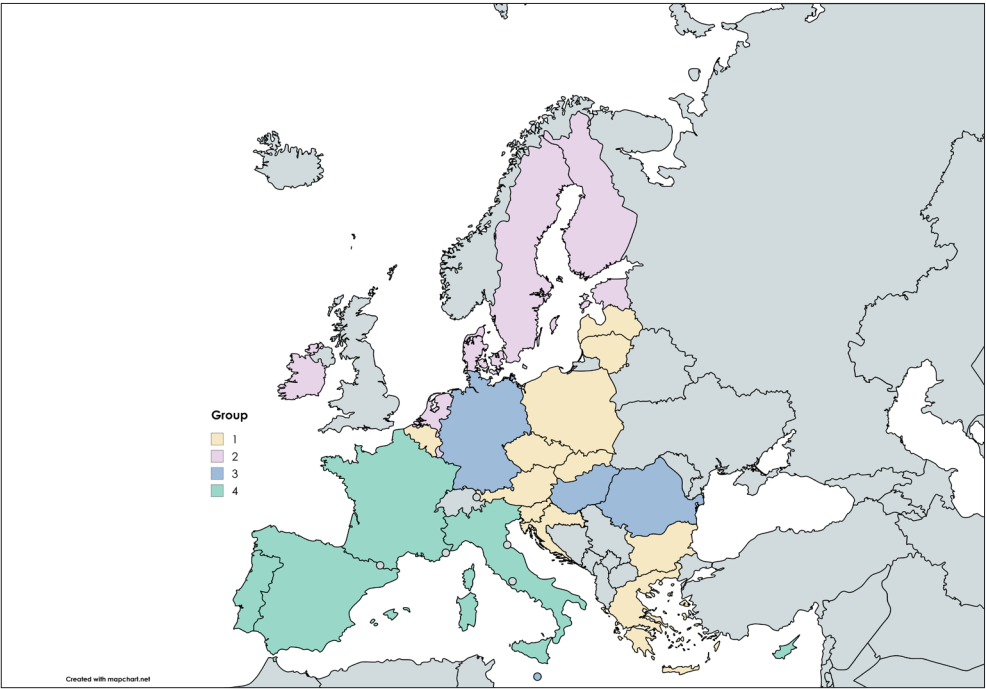


Fig. 3. Groups of EU-28 countries identified based on cluster analysis

Additionally, radar charts are presented in Figures 4–7 to illustrate the key factors influencing the level of educational and technological competencies of countries within each group, as determined by cluster analysis. The charts are filled with the average values of each variable (after standardization) for the respective clusters, allowing for a clear comparison of the characteristic features of each group.

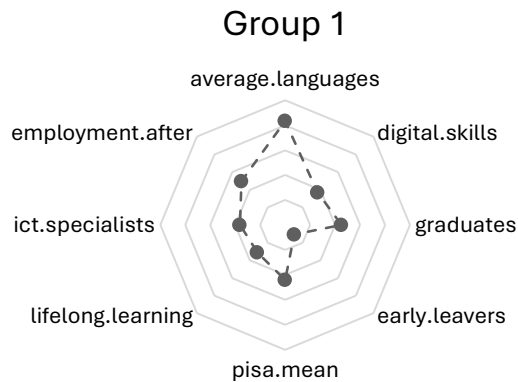


Fig. 4. Radar chart showing the average values of indicators for cluster Group 1

Group 1 consists of countries with a relatively strong education system, ensuring a high average number of foreign languages learned per student, as well as a low percentage of people who leave education and training early. However, digital skills in society remain at a moderate level, and the proportion of ICT specialists in the workforce is relatively low. Lifelong learning participation is also moderate, indicating a balanced but not particularly innovative approach to continuous education.

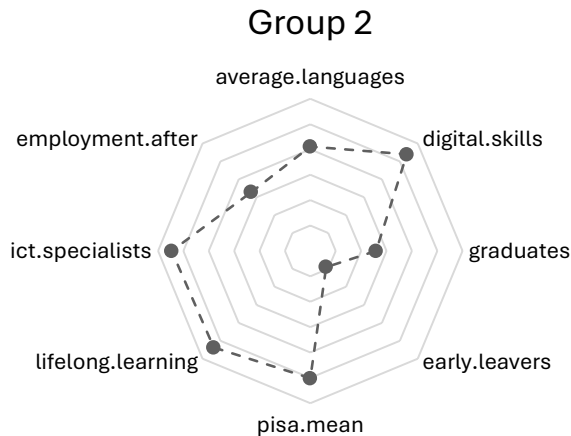


Fig. 5. Radar chart showing the average values of indicators for cluster Group 2

Group 2 stands out as the most advanced in terms of digital and educational competencies. These countries have the highest levels of digital skills, a strong presence of ICT specialists in the workforce and the best results in PISA assessments. They also exhibit a strong commitment to lifelong learning, indicating a culture of continuous education and adaptability. Although early school leaving is slightly higher than in some other groups, the overall educational attainment and employability of graduates are among the best.

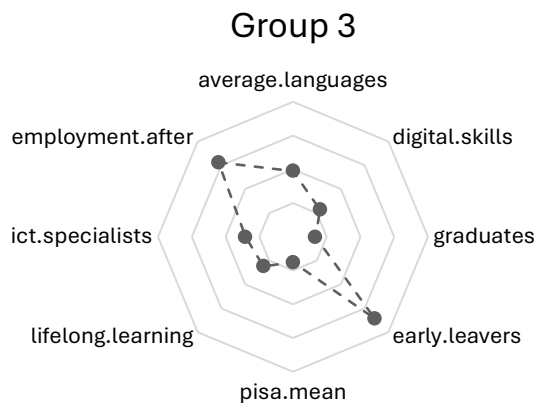


Fig. 6. Radar chart showing the average values of indicators for cluster Group 3

Group 3 represents countries struggling with several educational challenges. They have the lowest PISA scores and digital skills, coupled with a high rate of early school leavers. While employment opportunities for graduates are relatively strong, the overall level of higher education attainment is notably lower than in other groups. These countries face difficulties in fostering a highly skilled workforce that can compete in a technology-driven economy.

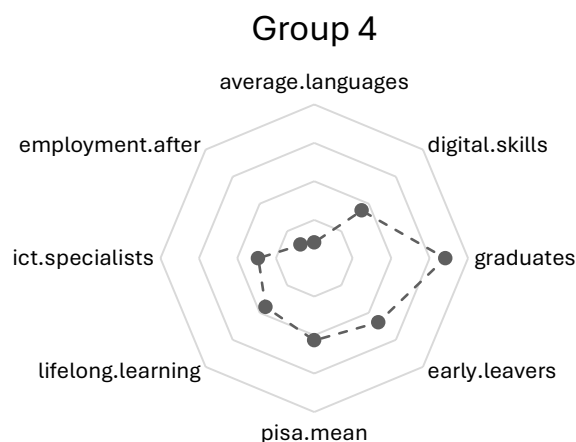


Fig. 7. Radar chart showing the average values of indicators for cluster Group 4

Group 4 is characterized by a high number of university graduates, yet their employability is lower compared to other groups. Digital skills are at a moderate level, and while participation in lifelong learning is above average, it does not reach the levels seen in Group 2. These countries seem to prioritize higher education but struggle with effectively integrating graduates into the labour market.

In summary, Group 2 leads in innovation and digital readiness, while Group 3 faces the most challenges. Groups 1 and 4 occupy intermediate positions, each with their own strengths and weaknesses.

4. DISCUSSION

The findings of this study, more specifically the results obtained with linear ordering methods, mostly align with previous research on the efficiency and performance of education systems in EU countries. For instance, M. Markowska, D. Strahl and A. Sokołowski [5] identified Sweden, Denmark, and Finland as highly efficient regardless of the flexibility allowed in indicator weighting. These results confirm this trend, demonstrating that Scandinavian countries perform strongly in educational and technological competencies and consistently rank among the top EU countries due to several key factors. Education in these nations plays not only an instructional role but also fosters civic engagement, contributing to the stability of democratic societies. Scandinavian schools emphasize student participation in

decision-making through councils and parliaments, supporting engagement and motivation. Furthermore, the near absence of private schools ensures equality, as the competitive public system provides high-quality knowledge to all students. The educational approach also minimizes excessive assessments, encourages a horizontal hierarchy in classrooms and prioritizes teacher training, underscoring their pedagogical professionalism rather than just academic knowledge [12].

Poland's position in education rankings has improved significantly over time. Basing on data from 2014, E. Roszko-Wójtowicz and M.M. Grzelak [6] placed Poland in eleventh place among EU countries, describing its performance as "satisfactory" compared to other nations that joined the EU after 2004. This study finds that Poland ranks eighth and can be assigned to the group of EU countries with above average technological and educational competencies of the societies. Poland ranks second in the EU for the lowest percentage of young people who do not continue their education, with only 3.7% leaving the system. Moreover, Poland boasts a high employment rate among graduates, as well as a high number of foreign languages learned per student. However, there are still areas that require further development. For instance, Poland ranks low in terms of adult participation in lifelong learning, indicating a lack of engagement in continuing education and professional upskilling. Given the dynamic labour market and the increasing demand for new competencies, addressing this issue is critical [13].

Consistent with previous research, Bulgaria and Romania continue to rank low in education system assessments. This may be due to their relatively recent accession to the EU and the ongoing transition of their education systems. These findings align with prior studies, which identified Romania, Greece, Spain, Bulgaria, Malta, and Italy as the least successful in achieving the educational goals set by the "Europe 2020" strategy [4].

Italy remains a notable case. E. Roszko-Wójtowicz and M. M. Grzelak [6] identified it as having the lowest government spending on education and the highest rate of youth neither working nor studying. This study confirms that little progress has been made in these areas over the years, highlighting the need for targeted policy interventions. Italy presents a unique case due to its stark regional disparities in education and economic development. Research by V. Peragine and L. Serlenga [14] highlights significant differences between northern and southern Italy in terms of equality of educational opportunities. The North-Central regions demonstrate considerably better access to education and higher levels of income, while the South struggles with lower educational attainment and economic performance. These inequalities stem from historical, economic, and social factors, including differences in governance and industrial development over centuries.

While the ranking results confirm existing findings on the relative efficiency of education systems across the EU, the cluster analysis provides additional insights into common challenges and strengths within specific groups of countries. Based on these patterns, it appears that targeted policy measures could help address structural weaknesses and further enhance educational outcomes.

It seems that countries of Central and Eastern Europe should focus on improving the digital skills of society and increasing the number of ICT specialists in the workforce, as well as

promoting lifelong learning. As research indicates, digital competences are “essential for personal development, employment, and active citizenship in today’s digital age.” To make sure that digital skills remain relevant and accessible to all, governments must integrate digital education into school curricula from an early stage, ensuring that students acquire fundamental ICT competencies. Moreover, digital literacy programs should be expanded to reach adults through vocational training and reskilling initiatives. Policymakers ought to focus on long-term strategies that include continuous updates of digital training materials, modern teaching methodologies, and robust monitoring mechanisms to track progress [15].

According to the results of this study, the Northern countries should maintain a high level of education and innovation and share their best practices with other EU countries. These countries emphasize pedagogical professionalism, student engagement and minimal reliance on excessive assessments, ensuring high levels of learning motivation and academic success. By fostering collaborations with lower-performing education systems, they can help implement evidence-based policies that improve learning outcomes.

It appears that Germany, Hungary, Malta, and Romania should prioritize investments in education, especially in the area of digital skills and improving results in PISA tests, as well as reducing the percentage of early school leavers. One effective approach to achieving these goals is by addressing social inequalities, which remain a key barrier to educational success in many European countries. For instance, Germany faces growing disparities in educational attainment, particularly among migrant children. These students frequently struggle with literacy, have lower graduation rates, and are more likely to repeat grades compared to their German peers [16]. Reducing these inequalities through targeted support, inclusive teaching methods, and comprehensive policy measures could significantly improve overall educational outcomes. Similarly, in Romania and Bulgaria – countries with the lowest average PISA scores, particularly in science – persistent socio-economic disparities hinder student achievement. Many students in these regions face inadequate access to high-quality education, contributing to their underperformance in STEM subjects. Improving access to well-trained teachers and modernizing the science curriculum could help bridge this gap. As highlighted by J. Osborne and J. Dillon [17, p. 9], “good quality teachers, with up-to-date knowledge and skills, are the foundation of any system of formal science education.”

Finally, Southern European countries should presumably focus on improving the employability of university graduates, as well as promoting digital skills and lifelong learning. One of the major challenges faced by these nations is the disconnect between higher education and labour market demands. For instance, in Italy, regional disparities contribute to significant inequalities in access to educational opportunities and employment prospects. To address these issues, education systems need to become more responsive to labour market needs by integrating practical skills training, entrepreneurship education and closer collaboration with industries. Additionally, increasing investment in digital education is crucial, as these countries lag in the number of ICT specialists and digital literacy levels. Lifelong learning initiatives must also be expanded to help professionals continuously adapt to a rapidly changing job market. By fostering a culture of continuous education and aligning academic curricula with economic needs, Southern European countries can improve job prospects for graduates and strengthen their economies in an increasingly digital world.

When considering the key takeaways for Poland, it becomes evident that while the country has made significant progress throughout the years, it still faces some challenges in advancing technological and educational competencies. The obtained results indicate that Poland's main weaknesses include low participation in lifelong learning, insufficient digital education and a relatively small percentage of ICT specialists in the workforce. To address these gaps, Poland could adopt best practices from top-performing countries such as Finland, Ireland and Sweden. For instance, a key factor influencing lifelong learning participation is the quality of early and formal education, particularly the effectiveness of teachers in fostering a culture of continuous skill development. Drawing inspiration from Finland, Poland ought to place a stronger emphasis on teacher training by both implementing more selective and rigorous teaching programmes and prioritizing teaching expertise rather than purely academic knowledge. Furthermore, following Ireland's example, Poland needs to invest more in developing digital skills from an early age. This can be done by implementing programmes like "Digital Strategy for Schools", which introduces young students to coding and programming at early stages of their education. Finally, to address both the low share of ICT specialists and the broader need for educational inclusivity, Poland should look to Sweden's approach and underscore the importance of equality and innovation in its educational system by promoting innovative teaching methods and ensuring equal opportunities for all children, regardless of their economic or ethnic background. On the other hand, it can be noted that Poland performs significantly better when compared to the countries that joined the European Union around the same time, especially in terms of the number of university graduates, as well as the percentage of young people employed after graduation. This indicates that Poland has been particularly successful in ensuring access to higher education and integrating graduates into the job market. Therefore, it is crucial for other newly acceded countries to strengthen these areas in order to boost their technological and educational development.

5. CONCLUSIONS

The main contribution of this paper is a comprehensive assessment of EU education systems that integrates both educational and technological competencies essential for navigating today's rapidly changing world. Beyond merely evaluating and comparing performance, its goal is to offer insights that can guide meaningful improvements. Similar to the work of D. Stumbriene, A. S. Camanho, and A. Jakaitiene [18], which shifts the focus from performance control to performance management, this research aims to contribute to the broader discourse on education system evaluation, emphasizing the necessity of a balanced, competency-based approach in shaping resilient and forward-looking societies. Overall, the study reinforces existing research on both the strengths and disparities of education systems across the EU. It also highlights the need for continued investment in education, particularly in digital skills and lifelong learning, to ensure sustainable economic and social development across all member states. Addressing regional inequalities, improving access to quality education, and fostering collaboration between countries will be key to achieving long-term progress.

REFERENCES

- [1] Berger N., Fisher P., *A well-educated workforce is key to state prosperity*, Economic Analysis and Research Network, 22.08.2013, <https://www.epi.org/publication/states-education-productivity-growth-foundations> [access: 12.02.2025].
- [2] Parra Díaz D.K., Yepes Ortiz V., *La educación como motor de la transformación productiva de los países*, Universidad EAFIT, Escuela de Economía y Finanzas, Medellín 2021, <https://repository.eafit.edu.co/items/56b3e0bc-0444-4e6a-91d3-a9cc6a861bad> [access: 20.02.2025].
- [3] Dumicic K., *Multivariate analysis of life-long learning in European countries*, [in:] *Proceedings of the 59th World Statistics Congress of the International Statistical Institute*, International Statistical Institute, Hague 2013, <https://2013.isiproceedings.org/Files/CPS205-P3-S.pdf> [access: 15.02.2025].
- [4] Kasprzyk B., Fura B., Wojnar J., *Pomiar realizacji kluczowych obszarów strategii Europa 2020 w krajach UE-28*, *Studia Ekonomiczne*, nr 276, 2016, pp. 159–170, <https://www.researchgate.net/publication/311616047> [access: 18.02.2025].
- [5] Markowska M., Strahl D., Sokołowski A., *Dynamic cluster analysis of educated and smart society development in European Union countries*, *European Research Studies Journal*, vol. 24, spec. iss. 4, 2021, pp. 52–64, <https://doi.org/10.35808/ersj/2582>.
- [6] Roszko-Wójtowicz E., Grzelak M.M., *Zastosowanie wybranych metod statystyki wielowymiarowej do oceny systemu edukacji w krajach członkowskich UE*, *Studia Regionalne i Lokalne*, nr 3(69), 2017, pp. 102–131, <https://doi.org/10.7366/1509499536905>.
- [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. 15, nr 4, 1968, pp. 307–327.
- [8] Kukuła K., *Metoda unitaryzacji zerowanej*, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 2000.
- [9] Wolak J., *An analysis of tourist attractiveness of poviats of the Lesser Poland Voivodeship*, *Folia Oeconomica Stetinensia*, vol. 20, no. 1, 2020, pp. 506–518, <https://doi.org/10.2478/fole-2020-0029>.
- [10] Ostasiewicz W., *Statystyczne metody analizy danych*, Wydawnictwo Akademii Ekonomicznej im. Oskara Langego, Wrocław 1998.
- [11] Turturean M., *The educational system in Romania and Finland: A comparative perspective based on official documents' analysis*, *International Journal of Social and Educational Innovation (IJSEIro)*, vol. 10, iss. 20, 2023, pp. 173–185, <https://www.journals.aseiacademic.org/index.php/ijsei/article/view/308/255> [access: 20.02.2025].
- [12] Lopatnikov S., *The role of education in modern Scandinavian society*, *Voprosy Studencheskoy Nauki*, no. 1(41), 2020, pp. 338–341, <https://cyberleninka.ru/article/n/the-role-of-education-in-modern-scandinavian-society> [access: 18.02.2025].
- [13] Grzelak M.M., Roszko-Wójtowicz E., *System edukacji w Polsce – wybrane problemy*, *Myśl Ekonomiczna i Polityczna*, nr 2(57), 2017, pp. 275–305, https://www.lazarski.pl/fileadmin/user_upload/oficyna/Mysl_Ekonomiczna_i_Polityczna/Mysl_EiP_2-17_1Grzelak_Roszko-Wojtowicz.pdf [access: 15.02.2025].

- [14] Peragine V., Serlenga L., *Higher education and equality of opportunity in Italy*, IZA Discussion Paper, no. 3163, IZA – Institute of Labor Economics, Bonn 2007. <https://ssrn.com/abstract=1037001> [access: 18.02.2025].
- [15] Vrabec N., Furtáková L., *Ways of defining digital competences and their components in the EU, EC and UNESCO recommendations*, Annales Universitatis Paedagogicae Cracoviensis. Studia de Cultura, vol. 16, iss. 2, 2024, pp. 5–17, <https://doi.org/10.24917/20837275.16.2.1>.
- [16] Diefenbach H., *Bildungschancen und Bildungs(miss)erfolg von ausländischen Schülern oder Schülern aus Migrantenfamilien im System schulischer Bildung*, [in:] Becker R., Lauterbach W. (eds.), *Bildung als Privileg: Erklärungen und Befunde zu den Ursachen der Bildungsungleichheit*, VS Verlag für Sozialwissenschaften, Wiesbaden 2007, pp. 217–241, https://doi.org/10.1007/978-3-531-90339-2_8.
- [17] Osborne J., Dillon J., *Science Education in Europe: Critical Reflections*, King's College London, Nuffield Foundation, London 2008, https://efepereth.wdfiles.com/local--files/science-education/Sci_Ed_in_Europe_Report_Final.pdf [access: 15.02.2025].
- [18] Stumbriene D., Camanho A. S., Jakaitiene A., *The performance of education systems in the light of Europe 2020 Strategy*, Annals of Operations Research, vol. 288, iss. 2, 2020, pp. 577–608, <https://doi.org/10.1007/s10479-019-03329-5>.

Przemysław Guziak*

ROZWÓJ POJAZDU ZEPHYR AGH Z WYSZCZEGÓLNIENIEM DOBORU JEDNOSTEK NAPĘDOWYCH

Nowa odsłona projektu Zephyr AGH jest próbą odpowiedzi na potrzebę niskoemisyjnego transportu, dlatego zaplanowano użycie jako jednostek napędowych silnika elektrycznego i pneumatycznego. Z powodu niskiej gęstości energii sprężonego powietrza silnik pneumatyczny będzie wykorzystywany w celu zapewnienia większej dynamiki jazdy i jedynie przy ruszaniu z postoju. Określono pożądane parametry projektowanego pojazdu, dokonano przeglądu dostępnych na rynku technologii i za najlepszy uznano silnik BLDC. Przeprowadzono obliczenia mające na celu wyznaczenie potrzebnej mocy i momentu obrotowego. Zwieńczeniem prac będzie analiza współpracy silnika elektrycznego z pneumatycznym i ocena roli drugiego z nich.

DEVELOPMENT OF THE ZEPHYR AGH VEHICLE WITH A FOCUS ON PROPULSION UNIT SELECTION

The latest iteration of the Zephyr AGH project aims to address the need for low-emission transportation. To achieve this, the design incorporates both an electric motor and a pneumatic engine as propulsion units. The pneumatic engine will be used primarily to enhance driving dynamics and will operate only during vehicle startup due to the low energy density of compressed air. Target performance parameters have been defined, a review of available market technologies has been conducted, and the BLDC motor has been selected as the optimal choice. Calculations have been carried out to determine the required power and torque. The final stage of the project will focus on analyzing the cooperation between the electric and pneumatic motors and assessing the role of the latter.

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

1. WSTĘP

Transport stanowi nieodłączny element cywilizacji. Od samych jej początków ludzie albo przemieszczali się na obszary bogate w pożądane zasoby, albo transportowali te zasoby do miejsca swojego zamieszkania. Wraz z rozwojem społeczeństw i powstawaniem ośrodków państwowych obejmujących rozległe terytoria transport zyskiwał na znaczeniu [1]. Wydarzeniami przełomowymi były wynalezienie maszyny parowej oraz silnika spalinowego, które skróciły czas transportu ludzi i towarów [2]. Niestety ich wadą jest emisja zanieczyszczeń i gazów cieplarnianych do atmosfery podczas pracy. W XXI wieku świat nauki jest zgodny co do istnienia znaczącego negatywnego wpływu nadmierowej (niewynikającej z występujących w przyrodzie naturalnych cykli) emisji gazów cieplarnianych na globalne zmiany klimatyczne i środowisko naturalne [3, 4]. Transport odpowiada za znaczną część emisji substancji uwalnianych do atmosfery przez człowieka [5], dlatego poszukuje się rozwiązań zaspokajających potrzebę transportu, których wpływ na klimat będzie znikomy.

2. POTENCJALNIE NISKOEMISYJNE TECHNOLOGIE TRANSPORTOWE

Rozwiązaniami, które mogą pomóc zmierzyć się z problemem emisji gazów cieplarnianych, są napędy pneumatyczny i elektryczny. Źródła energii, które wykorzystują te rodzaje napędu, w sprzyjających okolicznościach mogą być niskoemisyjne. Do ładowania akumulatorów lub zasilania sprężarki napędzającej zbiorniki musi być jednak używana energia ze źródeł niskoemisyjnych, czyli większości źródeł odnawialnych lub z elektrowni jądrowej [6].

Silnik pneumatyczny wykorzystuje energię zgromadzoną w sprężonym powietrzu do napędzania wału, a w konsekwencji pojazdu. Konieczne jest wyposażenie takiego układu w zbiorniki ze sprężonym powietrzem (lub innym gazem pod wysokim ciśnieniem, jednak powietrze jest najłatwiej dostępne, więc założono, że właśnie ono zostanie zastosowane). Wadą tej technologii jest niska gęstość energii, co zostanie szerzej omówione w dalszej części artykułu.

Silnik elektryczny czerpie energię dzięki przepływowi prądu przez jego uzwojenie, co powoduje ruch obrotowy wału, a więc wyprowadzenie mocy z silnika. Funkcję magazynu energii w pojazdach elektrycznych pełnią akumulatory, np. w technologii litowo-jonowej, które oferują stosunkowo wysokie gęstości energii, jednak nieporównywalnie niższe niż tradycyjne paliwa kopalne.

Pojazdy, które wykorzystują silniki elektryczne jako jedyne źródło zasilania, są już w powszechnym użyciu, jednak do tej pory nie znalazł zastosowania ani pojazd całkowicie pneumatyczny, ani łączący napęd pneumatyczny z elektrycznym. Zephyr AGH stanie się taką właśnie hybrydą. Z uwagi na znaczącą różnicę w gęstości energii sprężonego powietrza i akumulatorów podstawową jednostką napędową w pojeździe będzie silnik elektryczny, a silnik pneumatyczny będzie wykorzystywany w momencie ruszania z postoju. Dynamiczne przyspieszenie, które chciałby uzyskać kolidor, stanie się możliwe dzięki współpracy obu silników w czasie rozpędzania pojazdu. Spodziewane efekty zastosowania takiego rozwiązania to większa dynamika w początkowej fazie ruchu.

3. ZEPHYR AGH WCZORAJ I JUTRO

Pojazd Zephyr AGH (rys. 1) powstał w 2021 roku jako bolid wyścigowy napędzany sprężonym powietrzem. Skonstruowali go członkowie KN Nova Energia oraz KN Ignis, które działają na Wydziale Energetyki i Paliw AGH. W pierwszej odsłonie jednostką napędową był silownik pneumatyczny. Pod koniec fazy testów uległ on poważnemu uszkodzeniu, co spowodowało zmianę koncepcji napędzania pojazdu – zastąpiono go łatwo dostępnym dla kolistów silnikiem pneumatycznym o mocy 4 kW, co jednak nie przyniosło zadowalających efektów. Z uwagi na przerwę w finansowaniu oraz zmianę sytuacji życiowej większości z dotychczasowych realizatorów projektu prace przzerwano.



Rys. 1. Zephyr AGH z autorem niniejszego artykułu za kierownicą (początek 2023 roku)

W 2024 roku nowy zespół z KN Nova Energia wznowił prace przy pojeździe. Ponownie rozważono koncepcję i wyznaczono cele, starając się uwzględnić potrzebę dekarbonizacji transportu. Założeniem projektu jest zachowanie funkcjonalności właściwej samochodom i komfortu płynącego z dynamicznej jazdy przy zredukowanej emisji dwutlenku węgla. Parametry pojazdu, które konstruktorzy postanowili uzyskać, przedstawiono w tabeli 1.

Tabela 1. Zakładane parametry pojazdu Zephyr AGH

Prędkość [km/h]	Czas przyspieszenia do 100 km/h [s]	Zasięg [km]
200	3	200

Rozwój Zephyra w przedstawionym kierunku ma na celu:

- zbadanie charakteru współpracy obu silników i ocenę wpływu silnika pneumatycznego na dynamikę jazdy;
- analizę wzrostu skomplikowania układu napędowego w wyniku współistnienia obu rodzajów napędu;
- analizę korzyści i poniesionych nakładów wynikających z zastosowania obu napędów w pojeździe.

4. ŹRÓDŁA ENERGII W TRANSPORCIE

Określenie gęstości energii zawartej w sprężonym powietrzu nie jest sprawą prostą. Zależy ona od procesu, jaki zostanie przeprowadzony w celu jej odzyskania. Obecnie pojazd wyposażony jest w butlę o objętości 8 l zdolną do utrzymania powietrza pod ciśnieniem 150 barów. W przypadku rozprężania adiabatycznego wykonana praca równa jest co do wartości zmianie energii wewnętrznej gazu zgodnie z I zasadą termodynamiki:

$$\Delta U = -W \quad (1)$$

gdzie:

ΔU – zmiana energii wewnętrznej powietrza [J],
 W – praca wykonana przez powietrze [J].

Wykorzystując definicję energii wewnętrznej i model gazu doskonałego, otrzymujemy:

$$W = \frac{-5nR}{2}(T_k - T_p) \quad (2)$$

gdzie:

n – liczba moli gazu [mol],
 R – uniwersalna stała gazowa [J/(kg·K)],
 T_k – temperatura powietrza w butli po rozprężeniu [K],
 T_p – temperatura powietrza w butli przed rozprężeniem [K].

Przekształcając równanie stanu gazu doskonałego, możemy obliczyć wartość T_k :

$$\frac{p_p V_p}{T_p} = \frac{p_k V_k}{T_k} \quad (3)$$

$$T_k = \frac{p_k V_k T_p}{p_p V_p} \quad (4)$$

gdzie:

p_p – ciśnienie powietrza w butli przed rozprężeniem [Pa],
 p_k – ciśnienie, do jakiego powietrze jest rozprężane [Pa],
 V_p – objętość gazu w butli przed rozprężeniem [m³],
 V_k – objętość tej samej porcji gazu po rozprężeniu [m³].

Wykorzystując równanie Clapeyrona, otrzymujemy z kolei równanie na iloczyn nR :

$$pV = nRT \quad (5)$$

$$nR = \frac{pV}{T} \quad (6)$$

oraz z równania adiabaty wzór na V_k :

$$V_p^\kappa p_p = V_k^\kappa p_k \quad (7)$$

$$V_k = V_p \left(\frac{p_p}{p_k} \right)^{\frac{1}{\kappa}} \quad (8)$$

gdzie κ oznacza wykładnik adiabaty, który dla powietrza wynosi 1,4 [–].

Podstawienie równań (4), (6) i (8) do równania (2) i uproszczenie ich do poniższej postaci prowadzi do uzyskania wzoru na pracę wykonaną przez gaz przy rozprężaniu adiabatycznym, w którym wszystkie zmienne są znane:

$$W = \frac{-5p_p V_p}{2} \left(\frac{p_k \left(\frac{p_p}{p_k} \right)^{\frac{1}{\kappa}}}{p_p} - 1 \right) \quad (9)$$

Przy warunkach brzegowych, jakie obecnie reprezentuje Zephyr, otrzymuje się wartość 25 Wh.

Aby wyznaczyć ilość energii dostępną przy rozprężaniu izotermicznym, najprościej wyjść od definicji pracy. Równanie przybiera postać:

$$W = \int_{V_p}^{V_k} p dV \quad (10)$$

Po podstawieniu równania (5) otrzymujemy:

$$W = nRT_p \int_{V_p}^{V_k} \frac{dV}{V} \quad (11)$$

$$W = nRT_p \cdot \ln \frac{V_k}{V_p} \quad (12)$$

Ostatecznie, znów wykorzystując równanie (5), otrzymujemy:

$$W = p_p V_p \cdot \ln \frac{p_p}{p_k} \quad (13)$$

Wynikiem zastosowania wzoru (13) dla warunków brzegowych Zephyra jest 167 Wh. Przemiana, która w rzeczywistości zachodzi przy podawaniu powietrza na łopatkę silnika, jest czymś pomiędzy dwoma wyidealizowanymi drogami. Dokładna wartość nie ma jednak większego znaczenia, dlatego że zapotrzebowanie energetyczne pojazdu i tak jest dużo większe. Istotny jest wniosek: gęstość energii sprężonego powietrza jest bardzo niewielka, a duża masa zbiorników używanych do jego przechowywania sprawia, że wraz z hipotetycznym zwiększaniem ich liczby szybko rośnie także masa pojazdu, co z kolei powoduje wzrost zapotrzebowania na energię. Właśnie dlatego osiągnięcie określonego w założeniach projektowych zasięgu jest bardzo trudne lub nawet niemożliwe przy użyciu jedynie sprężonego powietrza jako nośnika energii.

Rozwiązaniem, które pozwala na dostarczanie energii niezbędnej do zasilania pojazdów elektrycznych, jest akumulator. Obecnie najwydajniejsze i najbardziej rozpowszechnione są akumulatory w technologii litowo-jonowej. Jest to jedna z elektrochemicznych metod magazynowania energii, która pozwala na uzyskanie gęstości energii w przedziale 100–200 Wh/kg [7].

Najbardziej popularnym rozwiązaniem w transporcie lądowym jest silnik spalinowy. Na jego korzyść przemawia prosta konstrukcja i wysoka gęstość energii paliwa sięgająca 12 000 Wh/kg w silniku wysokoprężnym i nieco mniej w benzynowym [8]. Nawet po uwzględnieniu sprawności silników spalinowych, która nie przekracza 45%, przewyższa o rząd wielkości gęstość energii w akumulatorach [9].

5. WYBÓR TYPU SILNIKA

Gdy zostały już określone założenia, należy ustalić, jak zespół konstruktorski chce je zrealizować.

Wytoczono cztery obszary robocze:

1. dobór silnika/silników umożliwiających dostarczenie niezbędnej mocy do pojazdu;
2. redukcję oporów dzięki obudowie o opływowym kształcie;
3. wykonanie takiego przełożenia, które najlepiej wykorzysta dostępną moc;
4. implementację dobranego silnika elektrycznego i umożliwienie jego współpracy z istniejącym lub nowym silnikiem pneumatycznym.

Dokonano przeglądu dostępnych na rynku technologii silników elektrycznych. Rozważono silnik asynchroniczny prądu przemiennego, silnik synchroniczny prądu przemiennego

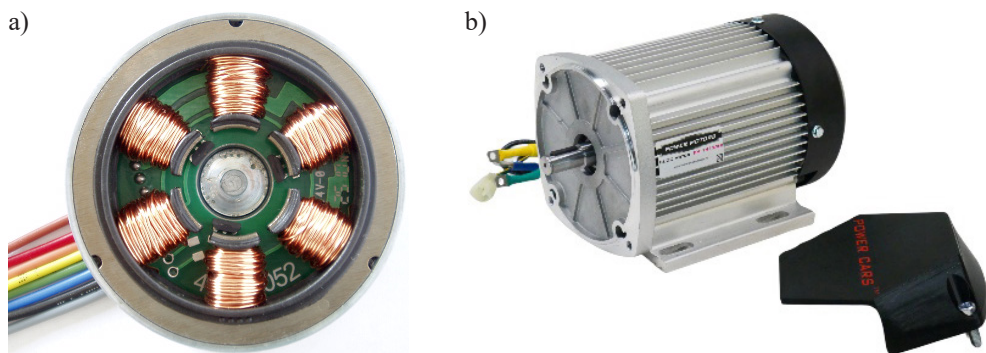
z magnesami trwałymi, silnik tarczowy prądu przemiennego z magnesami trwałymi oraz bezszczotkowy silnik prądu stałego (BLDC – *brushless direct-current motor*).

Silniki asynchroniczne prądu przemiennego cechują się prostą budową, nieskomplikowanym sterowaniem i niską ceną. Mają jednak wysoki stosunek masy do mocy, dlatego nie nadają się do zastosowania w pojeździe.

Silniki synchroniczne prądu przemiennego z magnesami trwałymi mają wysoki moment rozruchowy, jednak z uwagi na duży stosunek masy do mocy również nie znajdują zastosowania w motoryzacji.

Silniki tarczowe prądu przemiennego z magnesami trwałymi charakteryzują się niskim stosunkiem masy do mocy, wysokim momentem rozruchowym i małymi rozmiarami. Przypuszczalnie byłby to najlepszy wybór, jeśli wziąć pod uwagę jedynie aspekty techniczne. Niestety ograniczeniem jest wysoka cena tego typu silników, więc zastosowanie ich w pojeździe mogłoby znacząco wydłużyć czas realizacji projektu.

Silniki BLDC (rys. 2) charakteryzują się wysoką gęstością mocy, są proste w sterowaniu, mają kształt sprzyjający zamontowaniu w istniejącym pojeździe, a ponadto ceny takich silników są przystępne. Również ich moment obrotowy jest całkiem wysoki w szerokim zakresie prędkości. Po uwzględnieniu stosunku mocy do masy, charakterystyki mocy i momentu obrotowego, ceny, metody chłodzenia i sterowania wybrano silnik BLDC.



Rys. 2. Wnętrze (a) i zewnątrz (b) silnika BLDC (nie jest to ten sam silnik) [10, 11]

6. PROCEDURA OBLICZENIOWA

Moc potrzebną do utrzymania założonej prędkości oraz osiągnięcia pożądanego przyspieszenia wyznaczono, wykorzystując program Microsoft Excel. Ze względu na założoną prędkość, zapotrzebowanie na moc wyprowadzono z definicji pracy:

$$W = F \cdot s \quad (14)$$

Różniczkując po czasie, dostajemy moc:

$$P = F \cdot v \quad (15)$$

gdzie:

F – siła wypadkowa oporów działających na pojazd [N],

v – prędkość pojazdu [m/s],

W – jednostkowa praca mechaniczna [J],

s – jednostkowa droga [m],

P – zapotrzebowanie na moc mechaniczną [W].

Niezbędne jest także określenie oporów. Do wyznaczenia oporów toczenia zastosowano następujący wzór [12]:

$$F_t = \frac{m \cdot g}{1000} (12 + 0,0006 \cdot v^2) \quad (16)$$

gdzie:

F_t – siła oporów toczenia [N],

m – masa pojazdu [kg],

g – przyspieszenie ziemskie [N/kg],

v – prędkość pojazdu [m/s].

Wyznaczenie oporów toczenia jest skomplikowanym zagadnieniem i wpływ na ostateczny wynik ma wiele czynników, takich jak chociażby rodzaj materiału ogumienia, ciśnienie w oponie czy materiał nawierzchni, które uwzględnione są w stałych występujących we wzorze. Dlatego do celów obliczeń mocowych przyjęto dwukrotnie wyższe opory, niż wynika to ze wzoru (16).

Opór aerodynamiczny obliczamy ze wzoru [13]:

$$F_p = C_x \cdot A \cdot v^2 \cdot \frac{\rho}{2} \quad (17)$$

gdzie:

F_p – siła oporu aerodynamicznego [N],

C_x – współczynnik oporu aerodynamicznego [–],

A – powierzchnia czoła pojazdu [m²],

v – prędkość pojazdu [m/s],

ρ – gęstość powietrza [kg/m³].

W obliczeniach przyjęto współczynnik C_x równy 0,25 jako wartość, którą zespół planuje osiągnąć, oraz gęstość powietrza równą 1,2 kg/m³.

Sumując otrzymane wyniki i podstawiając je do równania (15), otrzymujemy wartość bliską 39 kW.

Zapotrzebowanie na moc ze względu na przyspieszenie obliczono z klasycznego wzoru na różnicę energii kinetycznej w czasie:

$$E_k = \frac{m \cdot v^2}{2} \quad (18)$$

Dzieląc równanie przez czas, otrzymujemy:

$$P = \frac{m \cdot v^2}{2 \cdot t} \quad (19)$$

gdzie:

- E_k – energia kinetyczna końcowa [J],
- m – masa pojazdu [kg],
- v – prędkość pojazdu [m/s],
- P – zapotrzebowanie na moc [W],
- t – czas do osiągnięcia założonej prędkości [s].

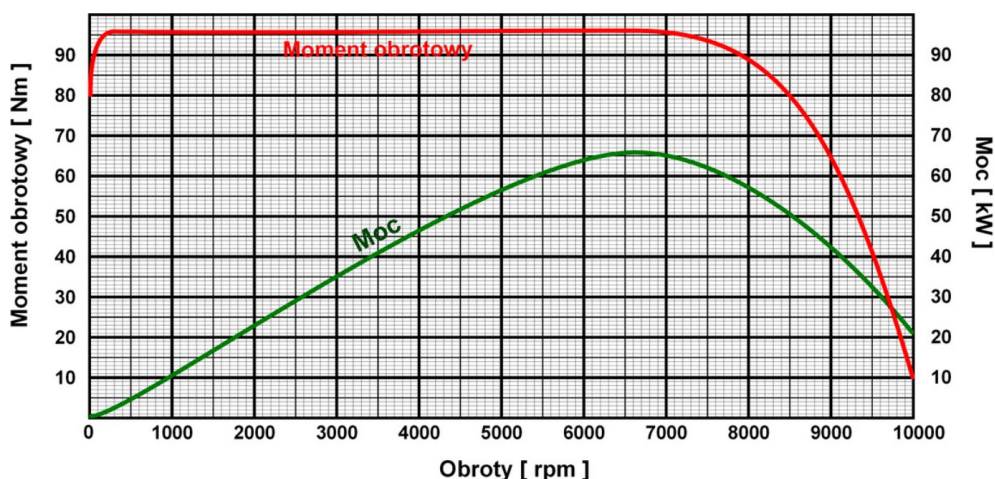
Potrzebna moc pojazdu zależy od jego masy, a masa od zainstalowanej mocy. Wobec tej wynikającej z natury rzeczy zależności dokonano przeglądu dostępnych na rynku modeli silników BLDC pod kątem stosunku ich mocy do masy. Uwzględniono również masę akumulatorów potrzebnych do dostarczenia pożądanej mocy do silnika, która również ma znaczący wpływ na masę pojazdu. Czynnikiem warunkującym ich masę okazuje się nie pojemność, a maksymalny prąd, jaki pojedynczy akumulator jest w stanie dostarczyć do silnika, gdyż ze względu na duże zapotrzebowanie na moc prądy płynące do silnika również osiągają relatywnie wysokie wartości. Po przeprowadzeniu obliczeń okazało się, że zapotrzebowanie na moc ze względu na przyspieszenie wynosi 50 kW.

Porównując zapotrzebowanie na moc wynikające z siły oporów oraz z pożądanego przyspieszenia, otrzymuje się końcowe zapotrzebowanie na moc równe 50 kW. W dalszych rozważaniach zakłada się zastosowanie jednego silnika o takiej mocy. Następnym etapem doboru jednostki napędowej jest sprawdzenie, jakim momentem obrotowym dysponują dostępne na rynku jednostki o takiej mocy oraz wyznaczenie przełożenia, jakie należy zastosować.

7. PRZEŁOŻENIE NAPĘDU I JEGO ZNACZENIE

Moc jest iloczynem momentu i prędkości obrotowej. Przy określonej prędkości obrotowej silnik pracuje z określoną mocą i momentem obrotowym. Przekładnia odpowiada za przekazywanie mocy z silnika na koła pojazdu. Może ona zwiększyć lub zmniejszyć moment obrotowy podawany na koło. Jego zwiększenie powoduje obniżenie prędkości obrotowej i odwrotnie. Przy ruchu ze stałą prędkością moment siły podawany na koło równoważy opory ruchu

zgodnie z I zasadą dynamiki Newtona – warunkuje on wówczas prędkość. Moc potrzebna do ruchu z określoną prędkością ściśle zależy od siły oporów, a ta od prędkości pojazdu. Dla konkretnej prędkości obrotowej silnika i konkretnej prędkości pojazdu istnieje dokładnie jedno przełożenie, które jest w stanie przenieść całą moc silnika na koła pojazdu. Jest ono wyrażone stosunkiem momentu podawanego na koło do momentu wychodzącego z silnika lub alternatywnie prędkości obrotowej silnika do prędkości obrotowej kół. Niedostosowanie przełożenia do pożądanych parametrów pojazdu powoduje albo niewykorzystanie całej dostępnej mocy, albo brakiem osiągnięcia prędkości, które byłyby możliwe przy zastosowaniu odpowiedniego przełożenia. W przypadku silnika o charakterystyce pokazanej na rysunku 3 kluczowe jest utrzymywanie prędkości silnika możliwie blisko 6500 obr/min. Wyposażenie pojazdu w kilka przełożeń różnej wielkości sprawia, że mogą one być dynamicznie zmieniane w zależności od pożądanej prędkości lub przyspieszenia. Większy moment na kołach umożliwi bardziej dynamiczne przyspieszenie, ale ograniczy prędkość pojazdu, zaś wyższa prędkość obrotowa umożliwi szybką jazdę, jednak z ograniczoną możliwością przyspieszania.



Rys. 3. Charakterystyka przykładowego silnika BLDC o mocy 66 kW [14]

Na podstawie obliczeń wyznaczono trzy przełożenia w taki sposób, by uzyskać kompromis – osiągnąć zakładane cele, ale nie spowodować zbytniego skomplikowania układu. Są to przełożenia 8 : 1 ; 4 : 1 i 2 : 1, co oznacza odpowiednio ośmiokrotne, czterokrotne i dwukrotne zwiększenie momentu obrotowego (i zmniejszenie prędkości obrotowej) względem wartości na wyjściu z silnika. Zespół konstruuje takie właśnie przełożenia wraz z systemem umożliwiającym ich płynną zmianę. Do obliczeń wykorzystano następujące równania:

$$P = M \cdot \omega \quad (20)$$

$$i = \frac{M_k}{M_s} = \frac{\omega_s}{\omega_k} \quad (21)$$

$$v_k = \omega_k \cdot r_k \quad (22)$$

gdzie:

- P – moc [W],
- M – moment obrotowy [Nm],
- ω – prędkość obrotowa [rad/s],
- i – przełożenie [–],
- v – prędkość pojazdu [m/s],
- r_k – promień koła [m].

Indeksy k odnoszą się do wielkości na kołach pojazdu, a s do wielkości na silniku.

8. PODSUMOWANIE

Dobór silnika do pojazdu jest kwestią złożoną. Wymaga wyznaczenia zapotrzebowania pojazdu na moc i moment obrotowy oraz na prąd doprowadzany do silnika. Ważną kwestią jest dobór takich przełożeń, które zapewnią optymalne wykorzystanie dostępnej mocy i przełożą odpowiedni moment obrotowy na koła. Rola silnika pneumatycznego będzie jedynie wspomagająca, ze względu na niską gęstość energii sprężonego powietrza. Jego spodziewany wpływ na jazdę to zwiększona dynamika przy ruszaniu z postoju.

9. PERSPEKTYWA

W bieżącym roku akademickim KN Nova Energia wykonuje prace konstrukcyjne, których zwieńczeniem będą badania osiągow pojazdu. Koliści mają nadzieję, że ich wyniki pozwolą odpowiedzieć na pytanie o to, czy przedstawione wyżej założenia sprawdzą się w praktyce. W przypadku pozytywnej weryfikacji koncepcji hybrydowego napędu elektryczno-pneumatycznego projekt położy podwaliny pod rozwój nowego rodzaju napędu w transporcie lądowym.

LITERATURA

- [1] Imperium Romanum, *Transport i podróże w starożytnym Rzymie*, <https://imperium-romanum.pl/geografia/transport-podroze-w-starozytnym-rzymie/> [dostęp: 27.02.2025].
- [2] Myszczyszyn J., *Wpływ maszyny parowej na rozwój gospodarczy świata w XIX i XX w.*, Kultura i Historia, nr 16, 2009, s. 95–102.
- [3] Haman K., *Naturalne i antropogeniczne przyczyny zmian klimatu*, Nauka, nr 1, 2008, s. 119–127.
- [4] Judzińska-Kłodawska A., *Analiza degradacji środowiska w aspekcie toksyczności spalin*, Autobusy. Technika, Eksploatacja, Systemy Transportowe, R. 15, nr 6, 2014, s. 145–148.

- [5] Parlament Europejski, *Emisje CO₂ z samochodów: fakty i liczby (infografiki)*, <https://www.europarl.europa.eu/topics/pl/article/20190313STO31218/emisje-co2-z-samochodow-fakty-i-liczby-infografiki> [dostęp: 18.06.2025].
- [6] Jędrak J., *Jakie manipulacje kryją się w terminie „odnawialne źródła energii”?*, <https://smoglab.pl/jakie-manipulacje-kryja-sie-w-terminie-odnawialne-zrodla-energii/> [dostęp: 27.02.2025].
- [7] Świat Baterii, *Akumulator LiFePO₄ 12.8V 50Ah do paneli solarnych i łodzi*, <https://swiatbaterii.pl/akumulatory-lifepo4/36683-green-cell-akumulator-lifepo4-50ah-128v-640wh-litowo-zelazowo-fosforanowy-do-kampera-wozka-golfowego-elektrowni-wiatrowej.html> [dostęp: 27.02.2025].
- [8] Pojazdy – samochody nowe i używane, *Wartość opałowa benzyny, diesla i LPG*, https://www.pojazdy.net/fizyka/wartosc-opalowa-paliw-silnikowych/#google_vignette [dostęp: 27.02.2025].
- [9] Karczewski M., Szczęch L., *Pomiary oporów wewnętrznych silnika spalinowego*, *Zeszyty Naukowe Akademii Marynarki Wojennej*, R. LIV, nr 2(193), 2013, s. 39–47.
- [10] Digi-Key Electronics Germany, *Silniki BLDC – coraz popularniejsze i łatwiejsze w aplikacji*, 2016, <https://elektronikab2b.pl/prezentacje/28803-silniki-blhc-coraz-popularniejsze-i-latwiejsze-w-aplikacji> [dostęp: 28.02.2025].
- [11] CarsLandia, *Silnik bezszczotkowy BLDC 60V 2200W PM 1424 – do gokarta buggy ATV*, <https://www.cars-landia.pl/akcesoria-i-czesci/silniki-elektryczne/173-silnik-bezszczotkowy-blhc-60v-2200w-pm-1424-do-gokarta-buggy-atv.html> [dostęp: 28.02.2025].
- [12] Domek M., *Opory ruchu pojazdu oraz minimalizacja oporów toczenia*, *Napędy i Sterowanie*, nr 12, 2017, s. 96–100.
- [13] SEAT, *Opór powietrza*, <https://www.seat.pl/glosariusz/o/opor-powietrza> [dostęp: 27.02.2025].
- [14] INTO, *Silniki elektryczne do motocykli, samochodów, łodzi*, https://www.into.pl/silniki/#silnik_66kW_BLDC_chlodzony [dostęp: 27.02.2025].

Małgorzata Hasal*

METODYKA SYNTEZY I DRUKU 3D ORAZ PRZYGOTOWANIA MONOLITÓW WĘGLOWYCH DO ZASTOSOWAŃ W OGRANICZENIU EMISJI CO₂ PRZEZ SEKTOR ENERGETYKI

Celem artykułu było opracowanie metodyki syntezy i druku 3D monolitów węglowych przeznaczonych do zastosowania w instalacjach wychwytu CO₂ z atmosfery metodą *direct air capture* (DAC). W ramach badań technologii druku SLA (stereolitografia) oraz FDM (osadzanie topionego materiału) wykorzystano do stworzenia precyzyjnych struktur prekursora o odpowiedniej geometrii i porowatości. Otrzymane monolity poddano wieloetapowej obróbce termicznej, obejmującej oksydację, pirolizę oraz aktywację fizyczną za pomocą CO₂, co pozwoliło uzyskać materiały o dużej powierzchni właściwej i zoptymalizowanej strukturze porowatej. Charakterystykę tekstury porowatej oraz zdolność adsorpcyjną badano przy użyciu analizy gęstości helowej oraz izoterm adsorpcji CO₂. Uzyskane wyniki wskazują, że druk 3D umożliwia precyzyjne projektowanie i kontrolę struktury monolitów węglowych, co przekłada się na ich efektywność w procesach adsorpcyjnych. Opracowana metoda stanowi istotny krok w kierunku rozwoju bardziej efektywnych materiałów adsorpcyjnych przeznaczonych dla technologii DAC.

METHODOLOGY FOR THE SYNTHESIS, 3D PRINTING, AND PREPARATION OF CARBON MONOLITHS FOR CO₂ EMISSION REDUCTION APPLICATIONS IN THE ENERGY SECTOR

This study presents a methodology for the synthesis and 3D printing of carbon monoliths designed for use in direct air capture (DAC) systems for atmospheric CO₂ removal. Stereolithography (SLA) and fused deposition modeling (FDM) were employed to fabricate precise precursor structures with optimized geometry and porosity. The printed monoliths underwent a multi-step thermal treatment process, including oxidation, pyrolysis, and physical activation using CO₂, resulting in materials with high specific surface areas and tailored porous structures. The porous texture and adsorption capacity were characterized through helium pycnometry and CO₂ adsorption isotherm analysis. The results demonstrate that 3D printing enables precise structural control of carbon monoliths, enhancing their performance in adsorption processes. The proposed methodology represents a significant advancement toward the development of more efficient adsorbent materials for DAC technologies.

* AGH Akademia Górniczo-Hutnicza, Wydział Energetyki i Paliw, Koło Naukowe CarbON.

1. WSTĘP

Zmiany klimatyczne są jednym z największych wyzwań współczesności, zarówno w kontekście środowiskowym [1–3], jak i gospodarczym [4, 5]. Wzrost koncentracji dwutlenku węgla (CO_2) w atmosferze, uznawany za główną przyczynę globalnego ocieplenia, wymaga skutecznych działań w zakresie redukcji emisji i wychwytywania istniejącego już CO_2 . Dwutlenek węgla stanowi około 80% globalnych emisji gazów cieplarnianych, przy czym jego głównym źródłem są procesy spalania paliw kopalnych oraz działalność przemysłowa [6, 7]. Z danych pochodzących ze stacji pomiarowej NOAA Global Monitoring Laboratory na wulkanie Mauna Loa na Hawajach wynika, że w roku 2023 średnie stężenie atmosferyczne dwutlenku węgla wynosiło 419,31 ppm (*parts per milion* – cząsteczek na milion), z niepewnością 0,15 [8]. Dla porównania należy dodać, że w roku 1750 (w czasie rozpoczęcia rewolucji przemysłowej) wartość ta osiągała około 278 ppm [9]. Pomimo globalnych wysiłków najprawdopodobniej nie uda się zrealizować wyznaczonych celów klimatycznych, w tym ograniczenia atmosferycznego stężenia CO_2 do poziomu 450 ppm.

Technologie CCUS (*carbon capture, utilization and storage*) obejmują procesy wychwytu, utylizacji oraz magazynowania CO_2 bezpośrednio u źródeł emisji, takich jak elektrownie czy zakłady przemysłowe, które wykorzystują paliwa kopalne lub biomasę jako podstawowe źródło energii [10]. Do tej grupy są zaliczane wychwyt wtórny, wychwyt pierwotny oraz spalanie w tlenie [11–13], a także nowocześniejsze metody, np. wychwyt bezpośredni z atmosfery, umożliwiający sekwestrację emisji historycznych oraz pochodzących z sektorów, w których redukcja emisji jest szczególnie trudna, jak rolnictwo czy transport. W tym celu wykorzystywane są technologie emisji ujemnych (NETs – *negative emissions technologies*), czyli rozwiązania pozwalające na zmniejszenie atmosferycznego stężenia dwutlenku węgla. Dzieli się głównie na metody inżynierskie oraz oparte na właściwościach samej przyrody, polegające m.in. na nasadzeniu drzew i ochronie naturalnie występujących lasów, łąk i mokradeł przed dewastacją [14–16].

Rozwiązania inżynierskie to bardziej zaawansowane technicznie podejście do tematu redukcji stężenia gazów cieplarnianych w atmosferze. Wykorzystują one zarówno proces fotosyntezy, jak i metody chemiczne. Przykładami są bioenergia z wychwytem i magazynowaniem CO_2 (BECCS – *bioenergy with carbon capture and storage*), proces wapniowo-sodowy oraz *direct air capture* (DAC) [14, 17, 18]. DAC to technologia, która polega na bezpośrednim wychwycie dwutlenku węgla z atmosfery dzięki procesom sorpcyjnym. Wśród rozwiązań technologicznych wyróżnia się dwa główne rodzaje: S-DAC, wykorzystujący stały materiał sorpcyjny, oraz L-DAC, opierający się na ciekłym medium sorpcyjnym.

Szczególną zaletą DAC jest całkowita niezależność procesu wychwytu od źródła emisji, ale skutkuje to wyjątkowo wysokimi kosztami instalacji tego typu. Według najnowszych analiz wykonanych w ramach programu badań i rozwoju w zakresie gazów cieplarnianych międzynarodowej agencji energii IEAGHG (International Energy Agency Greenhouse Gas R&D Programme) wychwyt i magazynowanie kosztują 400–700 USD za tonę netto CO_2 , przy uwzględnieniu przeciętnych kosztów energii z paneli fotowoltaicznych do zasilania. Koszty te mogą spaść do 350–550 USD za t CO_2 dzięki zastosowaniu tańszych OZE, jak energia geotermalna lub wodna [19]. Mimo że bezpośrednie porównanie kosztów wychwytu CO_2 przez

różne technologie jest trudne, to w przypadku DAC są one bardzo wysokie w porównaniu z innymi rodzajami NETs (np. BECCS) oraz rozwiązaniami opartymi na przyrodzie (odpowiednio 40–140 oraz 0–50 USD/net-tCO₂) [14, 15, 20].

W pracy zbadano możliwość zastosowania monolitów z węgla aktywnego wytworzonych przy użyciu druku 3D jako adsorbentów w urządzeniu do wychwytu dwutlenku węgla w systemach S-DAC. Węgłe aktywne obejmują liczną grupę nanomateriałów, które charakteryzują się wysoką porowatością oraz dużą powierzchnią właściwą, co umożliwia ich efektywne zastosowanie jako sorbentów. Mają one najczęściej postać proszków, drobnych granulek lub peletu. Dzięki swoim właściwościom są szeroko wykorzystywane w ochronie środowiska oraz w przemyśle, zwłaszcza w procesach takich jak usuwanie zanieczyszczeń, odzyskiwanie cennych składników, separacja mieszanin oraz modyfikacja właściwości związków chemicznych w fazach ciekłej i gazowej.

Właściwości adsorpcyjne węgla aktywnych wynikają przede wszystkim z ich rozwiniętej tekstury porowatej. Rozkład, wielkość oraz objętość porów decydują o dostępności miejsc aktywnych dla cząsteczek adsorbowanych substancji oraz o efektywności transportu masy wewnątrz struktury materiału. Charakterystyka zarówno tekstury porowatej, jak i grup funkcyjnych zależy od zastosowanej metody aktywacji (fizycznej lub chemicznej), rodzaju prekursora oraz warunków termicznej obróbki, które razem determinują końcowe właściwości adsorpcyjne materiału [21]. Do produkcji węgla aktywnego można wykorzystać różnorodne surowce (prekursory), ponieważ niemal każda materia organiczna nadaje się do przekształcenia w węgiel aktywny w procesie karbonizacji [21–23].

Wytworzona podczas aktywacji wysoko rozwinięta powierzchnia węgla aktywnego sprawia, że staje się on idealnym materiałem adsorpcyjnym. Adsorpcja jest procesem separacji, w którym wybrane składniki gazu lub cieczy są akumulowane na powierzchni ciała stałego (adsorbentu) dzięki oddziaływaniom elektrostatycznym lub siłom van der Waalsa. Jej selektywny charakter wynika głównie z różnicy w dostępności miejsc aktywnych na powierzchni adsorbentu oraz z siły oddziaływań pomiędzy tą powierzchnią a poszczególnymi składnikami. Cały proces jest odwracalny, istnieje możliwość regeneracji adsorbentu i odzysk adsorbentu w procesie desorpcji zachodzącym zazwyczaj w wyniku zmiany ciśnienia lub temperatury. Siła oddziaływań między adsorbentem a adsorbentem determinuje zarówno efektywność adsorpcji, jak i łatwość lub trudność desorpcji. Właściwy dobór adsorbentu jest kluczowy dla skuteczności i trwałości układu adsorpcyjnego, szczególnie w zastosowaniach przemysłowych, takich jak wychwyt CO₂ czy oczyszczanie gazów [24, 25].

Monolity węglowe stanowią unikalną klasę materiałów adsorpcyjnych, których pożądane cechy wynikają z dużej powierzchni właściwej i uporządkowanej struktury porowatej, a do tego ich zaletą jest mechaniczna wytrzymałość oraz możliwość precyzyjnego formowania kształtu. Istnieją dwie główne metody ich przygotowywania: polegająca na formowaniu wcześniej wytworzonego węgla aktywnego lub zachowaniu podczas obróbki termicznej struktury surowca, z którego monolity są produkowane. Zaprojektowanie struktury węglowej jest możliwe także dzięki zastosowaniu technologii druku 3D, co pozwala na dostosowanie geometrii do specyficznych wymagań aplikacyjnych oraz kontrolę struktur węglowych od skali makro- aż do skali nanometrycznej.

Monolityczna forma adsorbentu sprawia, że taki materiał lepiej sprawdza się w praktyce i często stanowi alternatywę dla sproszkowanego lub granulowanego węgla aktywnego. Zwarta struktura zapewnia wysoką wytrzymałość mechaniczną materiału, co zapobiega jego kruszeniu lub pyleniu. Jest to szczególnie istotne w zastosowaniach takich jak magazynowanie gazów wykorzystywanych w pojazdach, np. metanu czy wodoru [26]. Ponadto precyzyjne projektowanie struktury porowatej pozwala na minimalizację spadku ciśnienia przy dużych prędkościach przepływu, dzięki czemu monolity są szczególnie użyteczne w instalacjach takich jak filtry gazowe [27]. Wykazują również lepsze właściwości przewodzenia elektrycznego i cieplnego, co sprawia, że są użyteczne w takich obszarach jak technologie elektrochemiczne czy adsorpcyjne pompy ciepła [28].

W technologii produkcji monolitów węglowych z zastosowaniem druku 3D szczególnie ważny jest skład materiałów wykorzystanych do wydruku. Muszą one być wystarczająco odporne na temperatury, aby zachować nadaną im formę podczas procesów obróbki termicznej. Dodatkowo powinny zawierać odpowiednie ilości domieszek, które umożliwiają formowanie stabilnych struktur węglowych podczas pirolizy, co nadaje materiałom pożądane właściwości mechaniczne, termiczne oraz sorpcyjne.

Ponieważ żywice fotopolimerowe stosowane w druku stereolitograficznym (SLA) cechuje wysoka zawartość węgla, nadają się one do wytwarzania struktur monolitycznych o wysoko rozwiniętej powierzchni właściwej w procesach pirolizy, a następnie aktywacji. Powierzchnię właściwą można zwiększyć, stosując substancje porogenne, które nie uczestniczą w procesie fotopolimeryzacji, lecz inicjują separację faz, tworząc strukturalne szablony porów. Można to jednak osiągnąć również bez dodatków, dzięki kontrolowanemu procesowi oksydacji oraz samej pirolizie. Badania potwierdzają, że technologia druku SLA w połączeniu z odpowiednio dobranymi warunkami pirolizy stanowi efektywną metodę wytwarzania monolitów węglowych o pożądanych właściwościach adsorpcyjnych i mechanicznych [28, 29].

W pracy szczególną uwagę poświęcono wytwarzaniu z zastosowaniem druku 3D takich monolitów węglowych, które zostały precyzyjnie dostosowane do specyficznych wymagań urządzenia typu S-DAC. Kluczowe znaczenie ma możliwość optymalizacji kształtu monolitu w celu zapewnienia maksymalnej efektywności procesów adsorpcyjnych oraz dopasowania do indywidualnych parametrów operacyjnych systemu wychwytu CO₂.

2. PRZYGOTOWANIE PRÓBEK

2.1. PROJEKTOWANIE ORAZ WYDRUK PREKURSÓRÓW

Przykładowe kształty monolitów zaprojektowano w programie Autodesk Inventor Professional 2024, dążąc do osiągnięcia takiej stabilności oraz wytrzymałości mechanicznej, aby podczas obróbki termicznej geometria materiału nie ulegała deformacji, a także do uzyskania jak największej powierzchni, która miała zostać rozwinięta na kolejnych etapach. W pracy wykorzystano dwie drukarki 3D: Original Prusa MINI+ oraz Prusa SL1S SPEED. Pierwsza z nich cechuje się prostą, kompaktową konstrukcją i wykorzystuje metodę FDM (ang. *fused deposition modeling*), a druga to drukarka stereolitograficzna. Proces postprodukcji wydruków wykonanych metodą SLA ułatwia urządzenie Original Prusa CW1S, przeznaczone do mycia i utwardzania wydrukowanych elementów.

Druk stereolitograficzny był wykonywany z użyciem dwóch rodzajów żywic: 3DUV Standard White oraz Prusament Resin Tough Transparent Red. Ze względu na różny skład, wymagają one innego czasu naświetlania. W przypadku 3DUV Standard White wyniósł on 2,5 s na warstwę, a początkowy czas naświetlania pierwszej warstwy – 30,0 s. Prusament Resin Tough Transparent Red potrzebuje natomiast odpowiednio 2,6 s i 25,0 s. Wartości te były ustawiane na podstawie zaleceń producenta i weryfikowane podczas kalibracji. W technologii druku SLA czas naświetlania żywicy promieniowaniem UV jest kluczowym parametrem, który decyduje o stopniu polimeryzacji fotopolimeru, a tym samym o właściwościach mechanicznych, chemicznych i strukturalnych końcowego wydruku.

W druku FDM testowane były trzy materiały: ROSA 3D PLA Pastel, ROSA 3D PVA i PETG. Temperatury wydruku zostały dostosowane na podstawie zaleceń producenta oraz zoptymalizowane w celu uzyskania najlepszych właściwości mechanicznych i strukturalnych wydruków. Wynosiły one:

- w przypadku PLA i PVA: temperatura dyszy – 215°C dla pierwszej warstwy i 210°C dla każdej kolejnej, a temperatura na stole – 60°C.
- w przypadku PETG: temperatura dyszy – 240°C dla pierwszej warstwy i 250°C dla każdej kolejnej, a temperatura na stole – 85°C.

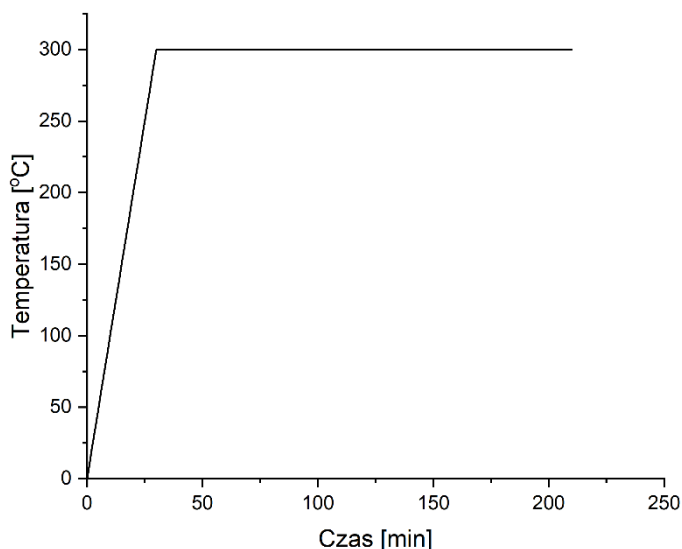
2.2. OBRÓBKA TERMICZNA

Obróbka termiczna wcześniej wydrukowanych monolitów polimerowych stanowi kluczowy etap ich przekształcania w struktury węglowe. Proces ten ma na celu nadanie materiałom właściwości charakterystycznych dla monolitów węglowych, takich jak duża powierzchnia właściwa i stabilność termiczna, przy jednoczesnym zachowaniu geometrii ukształtowanej podczas etapu przygotowania. Prowadzi on do kontrolowanej degradacji struktury polimerowej, eliminacji lotnych składników i utworzenia stabilnego szkieletu węglowego. W ramach niniejszej pracy przeprowadzono zarówno proces częściowego utlenienia (oksydacji), jak i pirolizy wydrukowanych wcześniej monolitów polimerowych, odpowiednio dobierając parametry obu etapów w celu uzyskania materiałów o optymalnych właściwościach strukturalnych i funkcjonalnych, dostosowanych do ich przyszłych zastosowań.

2.3. PROCES CZĘŚCIOWEGO UTLENIENIA (OKSYDACJI)

Proces częściowego utlenienia (oksydacji) próbek odbywał się w atmosferze powietrza przy stałym przepływie 1 l/min. Narost temperatury wynosił 10°C/min aż do osiągnięcia 300°C, a następnie temperatura ta była utrzymywana przez 4–6 h. Na rysunku 1 przedstawiono profil temperaturowy procesu oksydacji, ilustrujący przebieg nagrzewania, stabilizację temperatury oraz czas trwania tego etapu. Profil ten odzwierciedla kontrolowane warunki termiczne, które mają na celu zapewnienie stabilności struktury próbek oraz minimalizację deformacji geometrycznych przed kolejnym etapem obróbki termicznej – pirolizą. Oksydacja pełniła również funkcję procesu porogennego, prowadzącego do wstępnego otwarcia struktury materiału. W wyniku tego etapu nastąpiło częściowe usunięcie lotnych składników oraz kontrolowana modyfikacja powierzchniowa, co przygotowało materiał do dalszego rozwijania

struktury porowatej w trakcie pirolizy. Dzięki temu możliwe było uzyskanie lepszej dostępności powierzchni aktywnych oraz zwiększenie efektywności procesów adsorpcyjnych w końcowym produkcie.

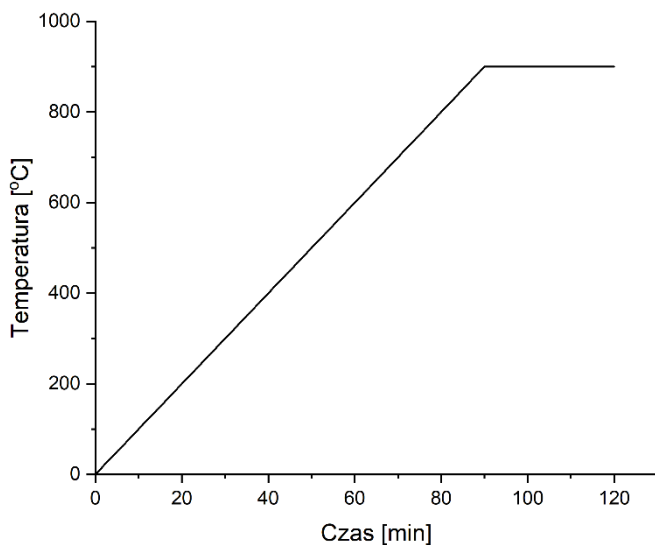


Rys. 1. Profil temperaturowy etapu oksydacji

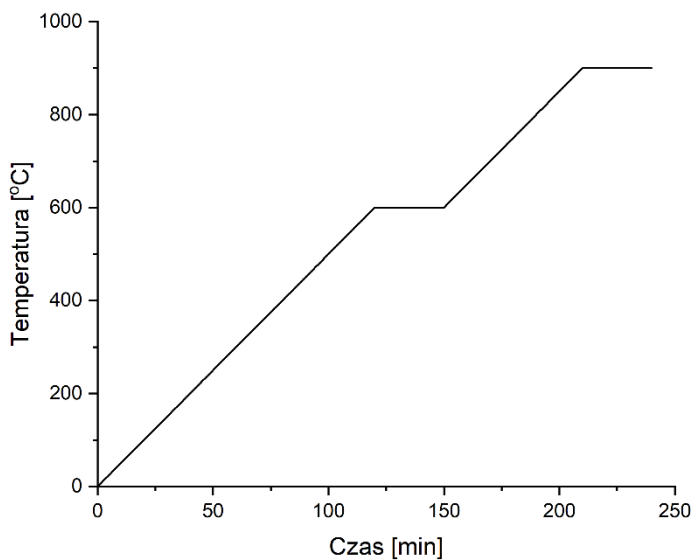
2.4. PIROLIZA

Piroliza próbek odbywała się w atmosferze gazu obojętnego (azotu) przy przepływie 1 l/min i była przeprowadzana jednoetapowo lub dwuetapowo. W pierwszym przypadku próbki były nagrzewane z prędkością 10°C/min aż do osiągnięcia temperatury 900°C, która była następnie utrzymywana przez 30 min (rys. 2). Zastosowanie drugiego sposobu wymaga natomiast dwóch etapów nagrzewania. Na pierwszym temperatura była podnoszona do 600°C z prędkością 10°C/min, a następnie utrzymywana przez 30 min, a na drugim etapie proces kontynuowano z prędkością 5°C/min aż do osiągnięcia temperatury 900°C, która również była utrzymywana przez 30 min (rys. 3).

Analiza dwóch sposobów przeprowadzania pirolizy miała na celu optymalizację parametrów strukturalnych i funkcjonalnych uzyskanych monolitów węglowych. Szczególną uwagę zwrócono na ograniczenie negatywnego wpływu wysokiej zawartości części lotnych w prekursorach polimerowych, co mogło prowadzić do utraty pierwotnego kształtu monolitów podczas procesu pirolizy. Dzięki zaplanowaniu etapu oksydacji przed właściwą pirolizą możliwe było częściowe usunięcie lotnych składników oraz stabilizacja struktury próbek. Takie przygotowanie pozwoliło na bardziej kontrolowany przebieg pirolizy i minimalizację ryzyka powstawania pęknięć, skurczu czy odkształceń geometrycznych. W rezultacie udało się zachować strukturę makroskopową monolitów węglowych, a tym samym uzyskać materiał o zoptymalizowanych właściwościach mechanicznych i adsorpcyjnych, co potwierdza skuteczność zastosowanej metody dwuetapowej obróbki termicznej.



Rys. 2. Profil temperaturowy jednoetapowej pirolizy

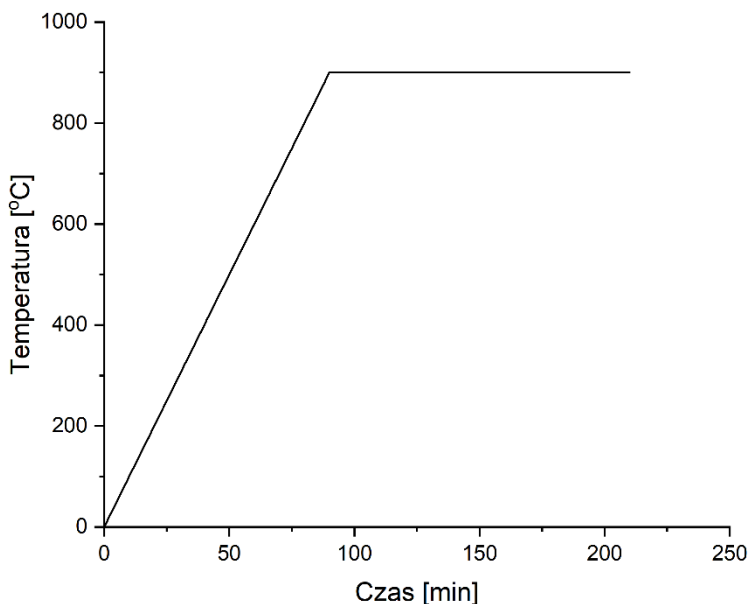


Rys. 3. Profil temperaturowy dwuetapowej pirolizy

2.5. AKTYWACJA FIZYCZNA ZA POMOCĄ CO₂

Proces aktywacji fizycznej uzyskanych w wyniku pirolizy karbonizatów odbywał się w atmosferze dwutlenku węgla przy przepływie 1 l/min w temperaturze 900°C, która była utrzymywana przez 5 h (rys. 4). W trakcie nagrzewania próbki z prędkością 10°C/min atmosfera

w piecu była jednak obojętna, z przepływem azotu o wartości 1 l/min. Zastosowanie N_2 na początku procesu ma na celu ochronę materiału przed przedwczesnym utlenieniem oraz zapewnienie stabilnych warunków, które minimalizują ryzyko niekontrolowanych reakcji chemicznych mogących wpłynąć na jakość struktury porowatej.



Rys. 4. Profil temperaturowy aktywacji fizycznej za pomocą CO_2

Podczas aktywacji fizycznej za pomocą CO_2 w stanie gazowym związek ten reaguje z powierzchnią monolitu węglowego w wysokiej temperaturze, co prowadzi do kontrolowanego rozwinięcia struktury porowatej materiału. Proces ten polega na częściowym usunięciu atomów węgla z powierzchni monolitu, w wyniku czego dochodzi do powstawania nowych porów oraz wzrostu mikroporowatości istniejących, a więc zwiększenia powierzchni właściwej i objętości porów. Dzięki temu monolity uzyskują lepsze właściwości adsorpcyjne, co jest szczególnie istotne w zastosowaniach związanych z wychwytem i magazynowaniem CO_2 .

3. METODY BADAWCZE

W celu zweryfikowania jakości uzyskanych monolitów węglowych konieczne jest zastosowanie odpowiednich metod badawczych, które umożliwią zebranie danych dotyczących ich powierzchni właściwej, struktury porowatej, zdolności adsorpcyjnych oraz utraty masy po procesach obróbki termicznej. Metody te pozwolą na obiektywną ocenę właściwości materiału oraz określenie jego przydatności w konkretnych zastosowaniach technologicznych.

3.1. WYZNACZANIE GĘSTOŚCI HELOWEJ

Gęstość badanych próbek została określona za pomocą piknometru helowego AccuPyc 1330 firmy Micromeritics, który służy do precyzyjnego pomiaru objętości i gęstości próbek na podstawie wyporności gazu. Hel jest stosowany jako gaz pomiarowy ze względu na niewielki rozmiar jego cząsteczek, które mogą przenikać nawet do najmniejszych porów badanego materiału. Dzięki temu uzyskane wyniki charakteryzują się wysoką dokładnością i powtarzalnością.

3.2. WYZNACZANIE IZOTERM ADSORPCJI CO₂

W celu wyznaczenia izoterm adsorpcji oraz pojemności sorpcyjnej względem CO₂ próbki monolitów zostały poddane wstępnemu przygotowaniu polegającemu na wygrzewaniu w temperaturze 200°C przez 6 h w próżni (1 mbar). Celem tego etapu było usunięcie wilgoci, zanieczyszczeń oraz lotnych składników, które mogłyby wpłynąć na dokładność pomiarów, tak aby zapewnić stabilność materiału przed dalszymi analizami. Po wygrzewaniu próbki zostały poddane pomiarowi izoterm adsorpcji CO₂ za pomocą urządzenia Quantachrome Autosorb-1C (Quantachrome Instruments). Jest to zaawansowane narzędzie do analizy i charakterystyki materiałów porowatych, które umożliwia precyzyjne wyznaczenie izoterm adsorpcji gazów w różnych warunkach ciśnienia i temperatury. Pomiar izoterm adsorpcji CO₂ za pomocą Quantachrome Autosorb-1C pozwala na określenie zdolności materiału do adsorpcji tego gazu i dostarcza informacji o strukturze porowatej monolitów. Można dzięki temu określić m.in. maksymalną pojemność sorpcyjną materiału, czyli maksymalną ilość CO₂, jaką jest on w stanie zaadsorbować przy danym ciśnieniu, co jest istotnym parametrem w kontekście technologii wychwytywania dwutlenku węgla takich jak *direct air capture* (DAC).

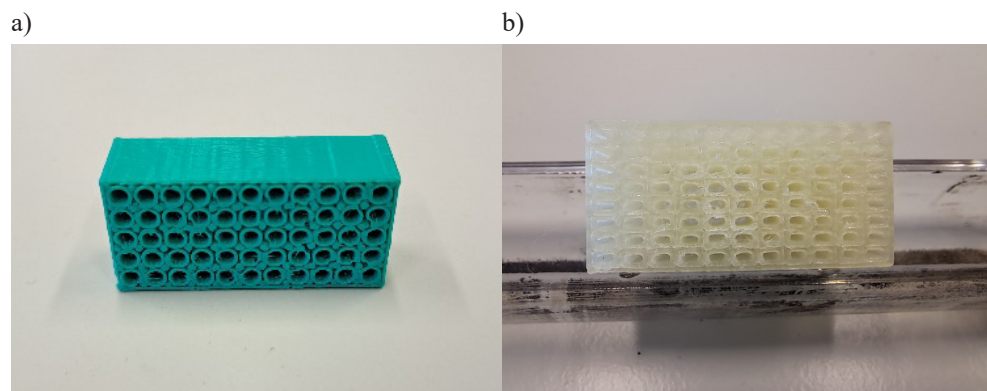
4. WYNIKI

4.1. WYDRUK MONOLITÓW – PREKURSÓRÓW

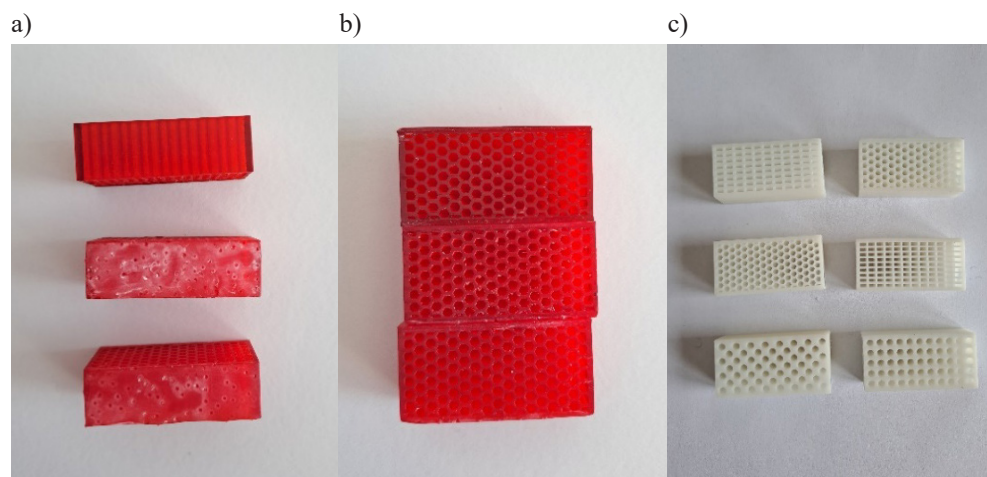
Wytwarzanie prekursorów metodą FDM okazało się niewystarczająco dokładne, co wpłynęło na jakość uzyskanych modeli (rys. 5). Wydruk z materiału PLA charakteryzował się brakami w strukturze, co mogło wynikać z ograniczonej precyzji tej technologii w przypadku bardziej skomplikowanych kształtów. Z kolei użycie materiału PVA dawało lepsze rezultaty pod względem jakości powierzchni, jednak w przypadku prostokątnych otworów nie było możliwe odtworzenie kątów prostych, co skutkowało niewielkimi błędami wymiarowymi.

Wydruki wykonane metodą SLA były cechowały się zdecydowanie większą dokładnością i precyznością, co czyni tę metodę bardziej odpowiednią do produkcji monolitów węglowych (rys. 6). W pierwszej kolejności prekursorzy zostały wydrukowane z żywicy Prusament Resin Tough Transparent Red, jednak te monolity nie spełniały oczekiwań jakościowych. Wprowadzenie kilku kluczowych zmian w procesie, takich jak modyfikacja sposobu generowania podkładek, zmniejszenie liczby jednocześnie drukowanych monolitów oraz wypoziomowanie podstawy drukarki, pozwoliło zapewnić lepszą przyczepność i precyzję wydruków, a także poprawić ich jakość.

Skurcz materiału podczas druku był minimalny, co jest istotne dla zachowania geometrii. Na przykład jeśli model miał wymiary 31,0 mm × 15,6 mm, to gotowe wydruki mierzyły 30,4 mm × 15,8 mm oraz 30,8 mm × 15,8 mm, co potwierdza wysoką jakość modeli wykonywanych metodą SLA.



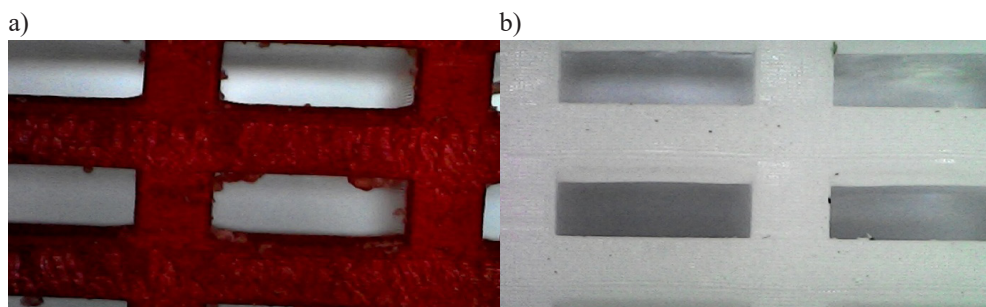
Rys. 5. Wydruki prekursorów z filamentu PLA (a) i PVA (b)



Rys. 6. Wydruki prekursorów z żywicy Prusament Resin Tough Transparent Red (a, b) i 3DUV Standard White (c)

Kolejnym testowanym materiałem była żywica 3DUV Standard White. Dzięki doświadczeniu zdobytemu podczas druku z użyciem poprzedniej żywicy udało się uzyskać monolityczne prekursory o lepszej jakości. Po wydrukowaniu próbek wykonano zdjęcia pod mikroskopem (rys. 7), co umożliwiło szczegółową analizę powierzchni monolitów. Prekursor wykonany z białej żywicy cechował się wyraźnie lepszą jakością, miał gładką i równomierną

powierzchnię. Z kolei monolit z czerwonej żywicy, mimo nieregularności powierzchni sprzyjającej rozwinięciu powierzchni właściwej, miał inną strukturę, potencjalnie mniej stabilną, co mogłoby negatywnie wpłynąć na późniejsze etapy procesu produkcji.

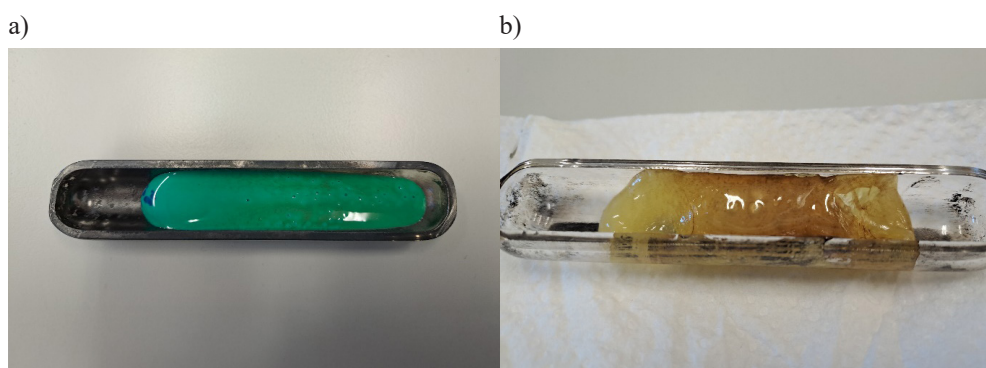


Rys. 7. Zdjęcia prekursorów wykonane za pomocą mikroskopu:
a) Prusament Resin Tough Transparent Red; b) 3DUV Standard White

4.2. OBRÓBKA TERMICZNA

Obróbka termiczna prekursorów drukowanych metodą FDM

Ze względu na ograniczoną wytrzymałość temperaturową filamentów stosowanych w druku FDM proces obróbki termicznej nie przyniósł pożądanych rezultatów. Żaden z testowanych materiałów (PLA, PETG i PVA), nie zachował pierwotnego kształtu podczas pierwszego etapu obróbki termicznej (rys. 8).



Rys. 8. Prekursory wykonane z filamentu PLA (a) i PVA (b) po obróbce termicznej

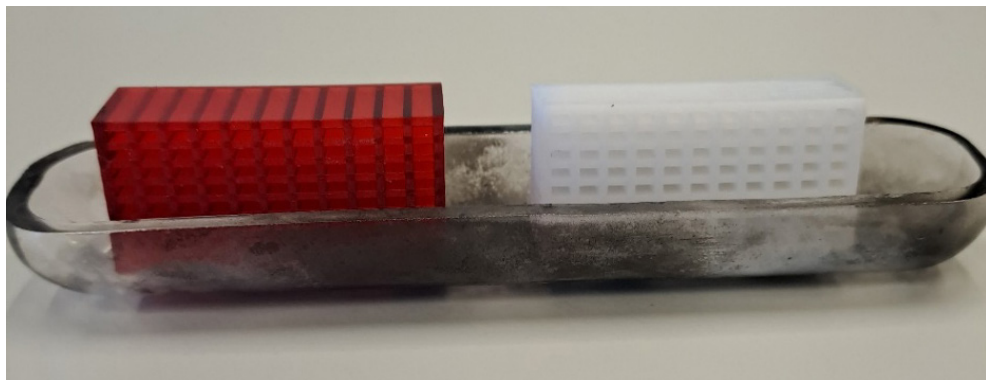
Próbki wykonane z PLA, który charakteryzuje się stosunkowo niską wytrzymałością temperaturową (około 60–65°C), uległy odkształceniu już w początkowej fazie nagrzewania. Struktura filamentu PLA sprawia, że łatwo poddaje się on deformacjom przy podwyższonej

temperaturze, co uniemożliwiło zachowanie geometrii monolitów. PETG, pomimo wyższej odporności, również nie przetrwał procesu obróbki termicznej w pożądanej formie. Filament ten topnieje w wyższych temperaturach (około 250°C), co skutkuje utratą kształtu i deformacją monolitu, nawet przy stosunkowo łagodnym wzroście temperatury. Również w przypadku PVA, który rozpuszcza się w wodzie i jest używany głównie jako materiał podporowy, proces obróbki termicznej prowadził do całkowitego rozpadu próbki. PVA nie jest przystosowany do wysokotemperaturowych warunków obróbki, a jego struktura została zniszczona już na wczesnym etapie procesu.

Z omówionych wyżej powodów nie można było przeprowadzić procesu obróbki termicznej (w tym pirolizy i aktywacji) testowanych materiałów. Podjęto więc decyzję o zaprzestaniu dalszych badań, ze względu na niewystarczającą odporność temperaturową materiałów oraz niemożność utrzymania pierwotnej struktury monolitów podczas obróbki termicznej. Badania te miały stanowić podstawę kolejnych eksperymentów z innymi materiałami, odpowiednimi do procesu produkcji monolitów węglowych.

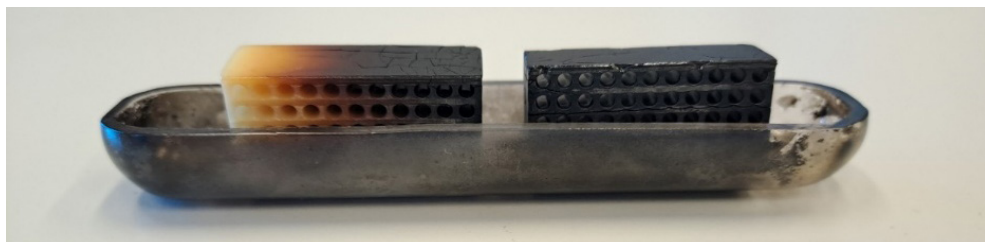
Obróbka termiczna prekursorów drukowanych metodą SLA

Próbki wydrukowane z żywicy światłoutwardzalnych metodą SLA oznaczone jako OP1 (czerwona żywica) oraz OP2 (biała żywica) zostały poddane obróbce termicznej (rys. 9) obejmującej proces oksydacji oraz jednoetapową pirolizę. W trakcie oksydacji oba monolity zmieniły kolor na czarny, co wskazywało na zachodzące procesy przemiany strukturalnej materiału. Próbka OP1 nie przeszła jednolitej reakcji oksydacji, co wynikało z nierównomiernego rozkładu temperatury w piecu (rys. 10). W efekcie podczas pirolizy część materiału, która nie została w pełni utleniona, nie była w stanie wytrzymać temperatury 900°C, co doprowadziło do jej uszkodzenia (rys. 11). Podczas tego procesu zaobserwowano wydzielanie się gęstego dymu oraz oleju pirolitycznego, co było wynikiem rozkładu materiału (rys. 12). W przypadku próbki OP2 podczas pirolizy również powstawał biały dym oraz olej pirolityczny, najsilniej w temperaturze 480–670°C. Także emisja skroplonych części lotnych była w tej temperaturze najbardziej intensywna.



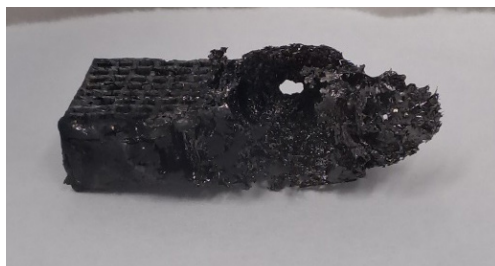
Rys. 9. Prekursory wykonane z żywicy SLA przed obróbką termiczną: próbka OP1 (po lewej) i próbka OP2 (po prawej)

Ubytek masowy próbki OP1 wyniósł 92,51%, a próbki OP2 – 87,25%. Po przeanalizowaniu wyników uzyskanych podczas jednoetapowej pirolizy zdecydowano się na przeprowadzenie tego procesu w dwóch etapach, co umożliwia uzyskanie lepszej kontroli nad wydzielaniem części lotnych oraz minimalizację ryzyka deformacji monolitów i dużych strat masowych. Celem tej zmiany było zapewnienie bardziej kontrolowanego przebiegu dekompozycji materiału, a w konsekwencji stopniowe usuwanie lotnych składników bez naruszania pierwotnej struktury monolitu.



Rys. 10. Prekursory wykonane z żywicy SLA po oksydacji: próbka OP1 (po lewej) i próbka OP2 (po prawej)

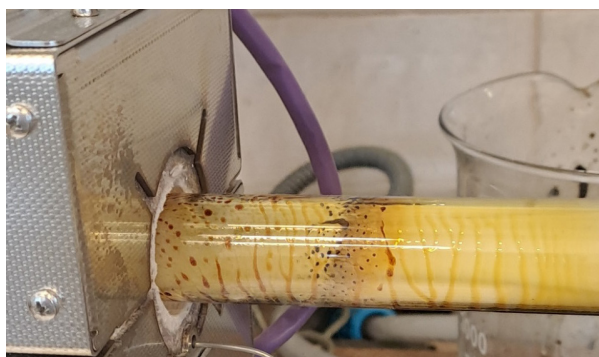
a)



b)

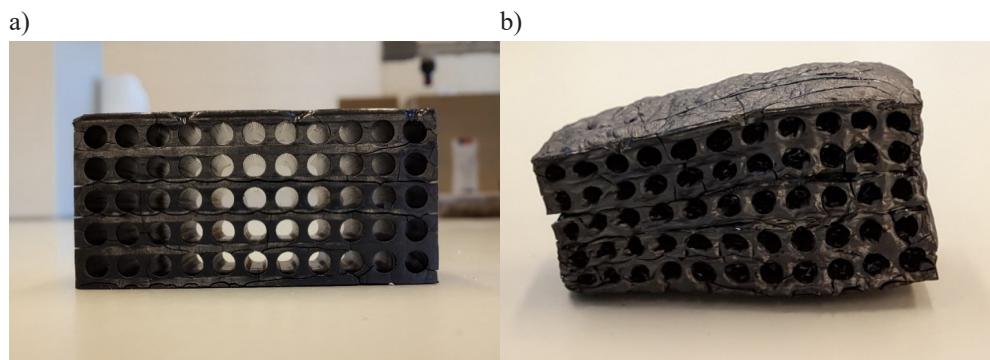


Rys. 11. Prekursory wykonane z żywicy SLA po obróbce termicznej: a) próbka OP1; b) próbka OP2



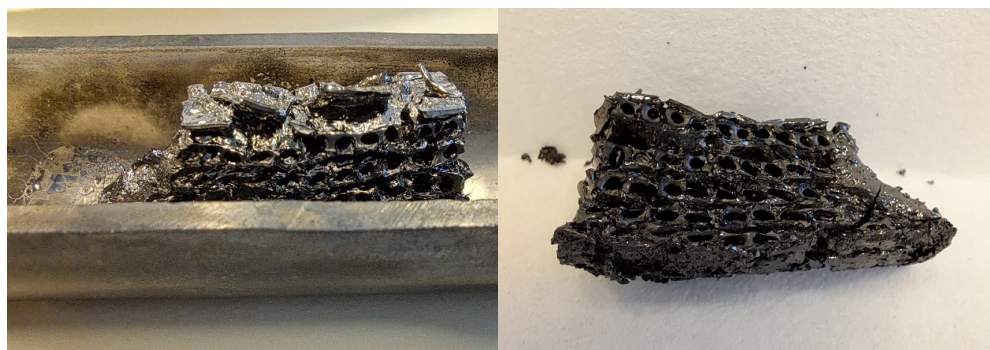
Rys. 12. Wydzielany w procesie obróbki termicznej dym i olej pirolityczny

Próbka O2P1 została poddana oksydacji (O), który przebiegł równomiernie na całej powierzchni, a następnie dwuetapowej pirolizie (2P) (rys. 13). Największa intensywność wydzielania części lotnych (w formie gazowej i skroplonej) została zaobserwowana w zakresie temperatury 420–600°C. Przeprowadzenie etapu pośredniego pirolizy, podczas którego temperatura była podnoszona do wartości 600°C, znacząco ograniczyło ich ilość, co miało pozytywny wpływ na kontrolowanie struktury monolitu. Dzięki temu proces przebiegał w sposób bardziej równomierny, a ryzyko deformacji materiału zostało zredukowane. Ubytek masowy monolitu O2P1 wyniósł 86,7%, co wskazuje na efektywne usunięcie części lotnych w kontrolowanych warunkach przy jednoczesnym zachowaniu stabilności strukturalnej materiału.



Rys. 13. Próbką O2P1 poddana procesowi oksydacji przed procesem dwuetapowej pirolizy (a) i po nim (b)

Aby zweryfikować zasadność przeprowadzania oksydacji i lepiej zbadać jej wpływ na obróbkę termiczną, prekursor 2P1 został poddany pirolizie bez wcześniejszej oksydacji (rys. 14). Podczas pirolizy zaobserwowano duży ubytek masy w czasie, gdy temperatura mieściła się w zakresie 320–580°C, co prowadziło do znacznej deformacji próbki oraz bardzo dużych strat. Ubytek masowy wyniósł 90,5%, co wskazuje na szybki rozkład materiału i deformację jego struktury w wyniku tego procesu.

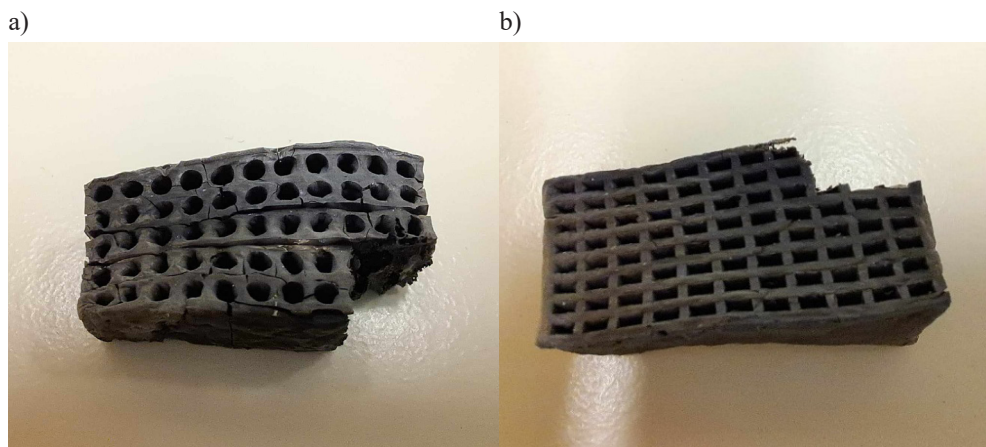


Rys. 14. Próbką 2P1 poddana procesowi pirolizy bez etapu oksydacji

Aktywacja fizyczna za pomocą CO₂

Dwa monolity (OP2 i O2P1), które przeszły proces oksydacji, a następnie pirolizy, zostały poddane aktywacji (rys. 15) w celu dalszego rozwinięcia struktury porowatej oraz zwiększenia powierzchni właściwej materiałów, co jest kluczowe dla poprawy ich efektywności w procesach adsorpcyjnych gazów. W przypadku próbki OP2, która przeszła jednoetapową pirolizę, udało się osiągnąć ten cel, jednak ze względu na jednolity charakter pirolizy i jej stosunkowo dużą szybkość ryzyko uszkodzenia struktury monolitu było wyższe. Szybkie wydzielanie części lotnych podczas pirolizy mogło prowadzić do miejscowych nieregularności w porowatości i negatywnie wpłynąć na zachowanie kształtu oraz wytrzymałość mechaniczną próbki.

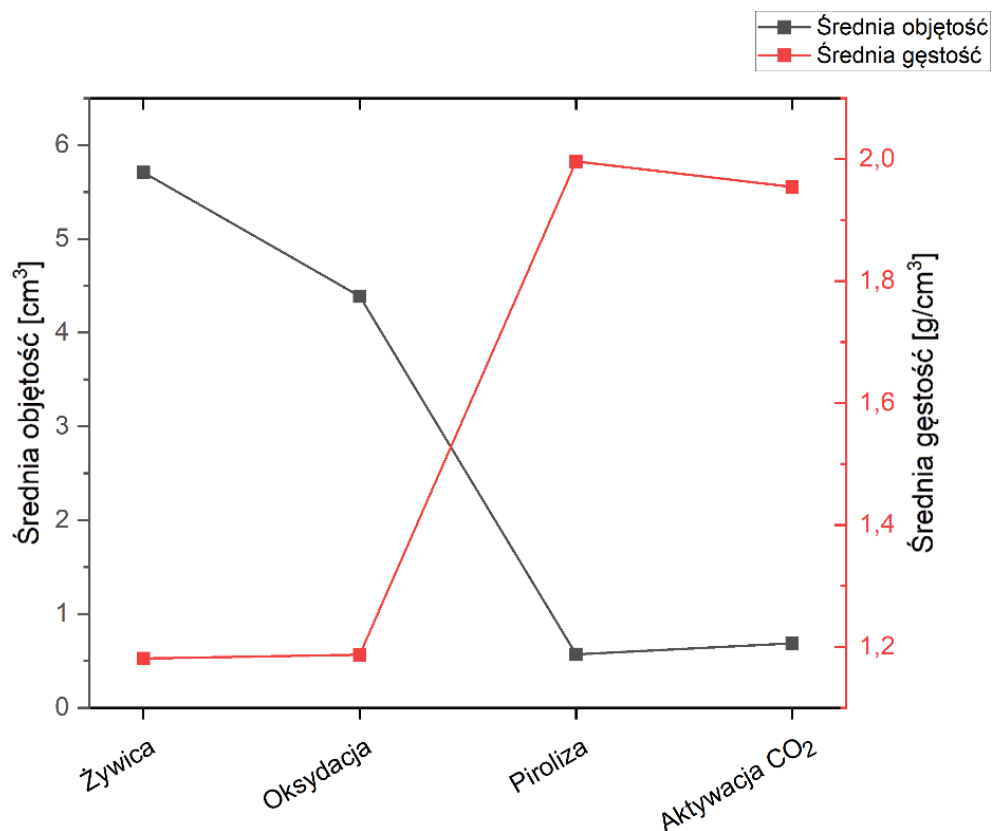
Monolit O2P1, który przeszedł pirolizę dwuetapową, wykazał natomiast wyraźnie lepszą stabilność strukturalną podczas procesu aktywacji. Dwuetapowy charakter pirolizy pozwolił na kontrolowane usuwanie części lotnych w pierwszej fazie, a następnie na bardziej równomierne podniesienie temperatury w drugiej fazie, co umożliwiło zachowanie integralności strukturalnej materiału. Dzięki temu proces aktywacji monolitu O2P1 okazał się bardziej efektywny, skutkował wyraźniejszym rozwojem porowatości i znaczącym zwiększeniem powierzchni właściwej przy zachowaniu stabilności strukturalnej materiału.



Rys. 15. Próbkę O2P1 (a) i OP2 (b) poddane aktywacji fizycznej za pomocą CO₂

4.3. GĘSTOŚĆ HELOWA PREKURSÓRÓW

Analiza próbek za pomocą piknomietru helowego pozwoliła na zebranie danych dotyczących objętości oraz gęstości monolitów na różnych etapach obróbki termicznej (rys. 16). Największą objętość, wynoszącą 5,710 cm³, monolity miały przed obróbką termiczną. Podczas procesu oksydacji jej wartość spadła do 4,387 cm³, a najniższa była po pirolizie – 0,569 cm³. Po procesie aktywacji objętość wzrosła, osiągając 0,687 cm³.

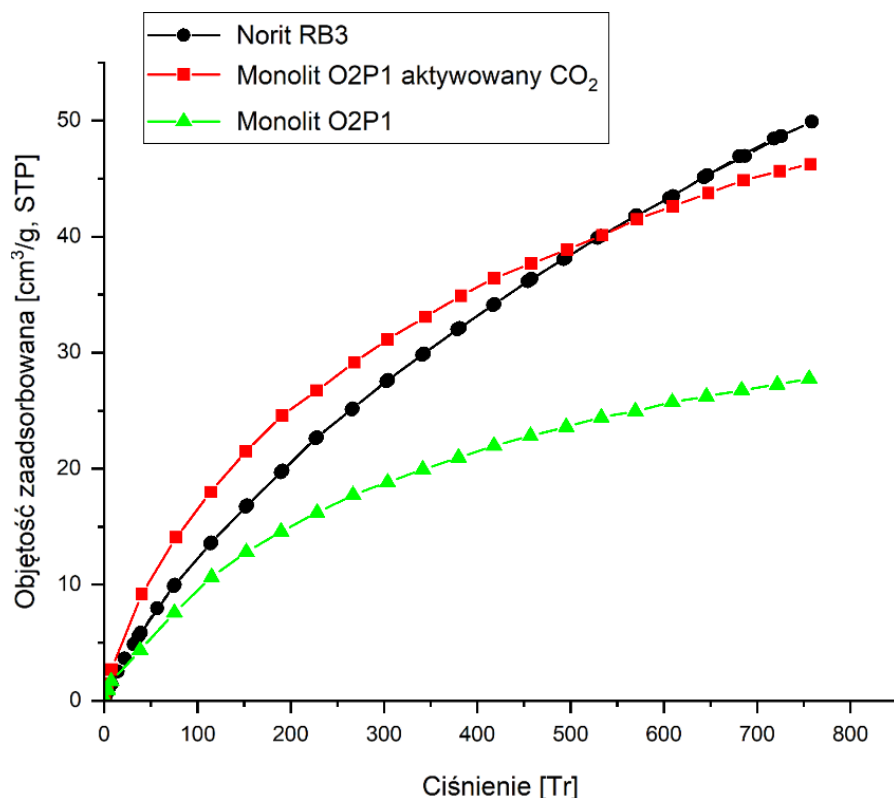


Rys. 16. Wykres zmian średniej objętości oraz średniej gęstości monolitu w wyniku obróbki termicznej

W odróżnieniu od objętości gęstość monolitów wzrastała w trakcie obróbki termicznej. Prekursor z żywicy miał gęstość $1,181 \text{ g/cm}^3$, która nieznacznie wzrosła podczas oksydacji (do $1,187 \text{ g/cm}^3$), by następnie w czasie pirolizy osiągnąć aż $1,996 \text{ g/cm}^3$. Aktywacja także miała wpływ na gęstość, która w czasie tego procesu zmniejszyła się do $1,954 \text{ g/cm}^3$.

4.4. WŁAŚCIWOŚCI ADSORPCYJNE

Zdolność adsorpcyjna materiału została określona na podstawie izoterm adsorpcji dwutlenku węgla, które obrazują zależność ilości adsorbowanej substancji (w centymetrach sześciennych na gram) od ciśnienia (w torach). Na rysunku 17 pokazano izotermy trzech materiałów: komercyjnego węgla aktywnego Norit RB3 oraz monolitów O2P1 przed procesem aktywacji i po nim. Pomiaru izoterm dokonano w warunkach atmosferycznych, które uznano za zbliżone do warunków pracy urządzeń DAC, ponieważ takie pomiary są najbardziej istotne dla określenia przydatności monolitów w tej technologii. Temperatura wynosiła 25°C , a ciśnienie było zbliżone do atmosferycznego.



Rys. 17. Wykres izoterm adsorpcji dwutlenku węgla w temperaturze 25°C

5. PODSUMOWANIE

W wyniku przeprowadzonych badań opracowano metodykę syntezy i druku 3D monolitów węglowych o zoptymalizowanych właściwościach adsorpcyjnych. Proces rozpoczęto od zaprojektowania modeli w programie CAD, a następnie wykonano prekursorów przy użyciu technologii druku 3D metodami FDM oraz SLA. Kluczowe znaczenie miały odpowiednie przygotowanie i kalibracja drukarek oraz przeprowadzenie precyzyjnej postprodukcji dostosowanej do specyfiki każdej z metod, co pozwoliło na uzyskanie elementów o wysokiej jakości strukturalnej i mechanicznej.

Kolejnym istotnym etapem była obróbka termiczna prekursorów w celu uzyskania karbonizatów. Proces obejmował wstępną oksydację w temperaturze 300°C przez 6 h, a następnie dwuetapową pirolizę, przeprowadzoną w temperaturach 600°C i 900°C. Optymalne okazało się zastosowanie wieloetapowego procesu, który pozwolił na uzyskanie materiału o pożądanych właściwościach strukturalnych i teksturalnych. Końcowym etapem była aktywacja fizyczna przy użyciu dwutlenku węgla w temperaturze 900°C przez 5 h, co znacząco zwiększyło powierzchnię właściwą i pojemność adsorpcyjną monolitów.

Otrzymane monolity węglowe poddano analizie właściwości adsorpcyjnych z wykorzystaniem piknomietru helowego, wyznaczono także izotermy adsorpcji dwutlenku węgla. Wyniki potwierdziły wysoką efektywność opracowanej metody oraz potencjał uzyskanych materiałów do zastosowań w technologii *direct air capture* (DAC). Cel pracy został osiągnięty dzięki dobraniu właściwych metod druku 3D oraz obróbki termicznej umożliwiających uzyskanie monolitów o zoptymalizowanych właściwościach adsorpcyjnych i stabilnej strukturze.

W wyniku przeprowadzonych badań oraz analizy literatury sformułowano następujące wnioski:

- Wykorzystanie druku 3D do produkcji prekursorów monolitów węglowych umożliwiło uzyskanie pożądanej formy geometrycznej oraz materiału o wysokiej wytrzymałości mechanicznej.
- Żywice fotopolimerowe okazały się materiałem bardziej odpowiednim do produkcji prekursorów niż filamenty, ponieważ ich zastosowanie zapewniało stabilność geometryczną struktur podczas obróbki termicznej oraz minimalizowało ryzyko deformacji. Monolity węglowe uzyskane z prekursorów wydrukowanych w technologii SLA charakteryzowały się wysoką stabilnością mechaniczną i brakiem pylenia, co stanowi o ich przewadze nad sproszkowanym węglem aktywnym. Właściwości te umożliwiają ich zastosowanie w warunkach narażenia na wibracje, np. w urządzeniach DAC do wychwytu CO₂ z atmosfery czy magazynach wodoru w systemach mobilnych.
- Proces obróbki termicznej obejmujący oksydację w temperaturze 300°C przez 6 h, a następnie dwuetapową pirolizę w 600°C i 900°C oraz aktywację CO₂ w 900°C przez 5 h pozwolił uzyskać monolity o zoptymalizowanej strukturze i dużej zdolności adsorpcji CO₂.
- Gęstość monolitów wzrastała na kolejnych etapach obróbki termicznej, co odzwierciedlało zmiany strukturalne materiału. Po oksydacji (300°C) zaobserwowano niewielki wzrost gęstości związany z usunięciem części lotnych. W trakcie dwuetapowej pirolizy (600°C i 900°C) nastąpiła znacząca konsolidacja struktury aż do maksymalnej gęstości 1,9962 g/cm³. Po aktywacji CO₂ (900°C przez 5 h) gęstość nieznacznie spadła do 1,9544 g/cm³, co było efektem rozwoju porowatości.
- Analiza izoterm adsorpcji CO₂ wykazała, że monolity węglowe uzyskane w procesie aktywacji cechowała wysoka pojemność sorpcyjna (46,22 cm³/g), zbliżona do wartości osiąganych przez komercyjny węgiel aktywny (49,89 cm³/g) i znacząco przewyższająca pojemność monolitów przed aktywacją (27,75 cm³/g). Szczególnie korzystne właściwości sorpcyjne monolitu po aktywacji ujawniają się w warunkach niskiego ciśnienia, podobnego do atmosferycznego – efektywność sorpcyjna produktu przewyższa wtedy nawet właściwości komercyjnego węgla aktywnego.
- Porównanie izoterm monolitów przed aktywacją i po niej wyraźnie wskazuje, że odgrywa ona kluczową rolę w procesie rozwijania powierzchni właściwej monolitu i zwiększania jego zdolności sorpcyjnych.
- Porównanie monolitu węglowego z komercyjnym węglem aktywnym pokazuje, że wytworzony w opracowany sposób produkt osiąga parametry adsorpcyjne bardziej dopasowane do zastosowań w DAC przy jednoczesnym zachowaniu zaprojektowanej w programie CAD geometrii podczas druku 3D.

Informacja o finansowaniu

Wsparcie finansowe udzielone w ramach programu *Inicjatywa Doskonałości – Uczelnia Badawcza* (IDUB), Działanie: D12 – *Integracja procesu kształcenia z badaniami naukowymi*, w ramach konkursu *Wsparcie Kół Naukowych* – edycja V, 2024/25.

LITERATURA

- [1] Lindsey R., Dahlman L., *Climate change: global temperature*, 2025, <https://www.climate.gov/news-features/understanding-climate/climate-change-global-temperature> [dostęp: 29.05.2025].
- [2] United Nations, *Causes and effects of climate change*, <https://www.un.org/en/climatechange/science/causes-effects-climate-change> [dostęp: 26.11.2024].
- [3] IPCC, *Climate change widespread, rapid, and intensifying – IPCC*, <https://www.ipcc.ch/2021/08/09/ar6-wg1-20210809-pr/> [dostęp: 26.11.2024].
- [4] European Environment Agency, *Economic losses from weather- and climate-related extremes in Europe*, 2024, <https://www.eea.europa.eu/en/analysis/indicators/economic-losses-from-climate-related> [dostęp: 21.12.2024].
- [5] Hoegh-Guldberg O. i in., *Impacts of 1.5°C global warming on natural and human systems*, [w:] Masson-Delmotte V. i in. (eds.), *Global Warming of 1.5°C. An IPCC Special Report on The Impacts of Global Warming of 1.5°C above Pre-Industrial Levels and Related Global Greenhouse Gas Emission Pathways, in The Context of Strengthening the Global Response to The Threat of Climate Change, Sustainable Development, and Efforts to Eradicate Poverty*, Cambridge University Press, Cambridge, UK – New York, NY, USA 2022, s. 177–182. <https://doi.org/10.1017/9781009157940.005>.
- [6] Europejska Agencja Środowiska (EEA), *Infografika: Emisje gazów cieplarnianych w Unii Europejskiej wg sektora i krajów*, 2018, <https://www.europarl.europa.eu/topics/pl/article/20180301STO98928/infografika-emisje-gazow-cieplarnianych-w-unii-europejskiej> [dostęp: 5.11.2024].
- [7] US EPA, *Overview of greenhouse gases*, <https://www.epa.gov/ghgemissions/overview-greenhouse-gases> [dostęp: 26.11.2024].
- [8] Lan X., Tans P., Thoning K.W., *Trends in globally-averaged CO₂ determined from NOAA Global Monitoring Laboratory measurements*, 2025, <https://doi.org/10.15138/9N0H-ZH07>.
- [9] Gulev S.K. i in., *Changing state of the climate system*, [w:] Masson-Delmotte V. i in. (eds.), *Climate Change 2021 – The Physical Science Basis*, Cambridge University Press, Cambridge, UK – New York, NY, USA 2023, s. 287–422. <https://doi.org/10.1017/9781009157896.004>.
- [10] IEA, *Carbon Capture Utilisation and Storage*, <https://www.iea.org/energy-system/carbon-capture-utilisation-and-storage> [dostęp: 8.12.2024].
- [11] Hong W.Y., *A techno-economic review on carbon capture, utilisation and storage systems for achieving a net-zero CO₂ emissions future*, Carbon Capture Science & Technology, vol. 3, 2022, 100044, <https://doi.org/10.1016/J.CCST.2022.100044>.

- [12] Chao C., Deng Y., Dewil R., Baeyens J., Fan X., *Post-combustion carbon capture*, Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 138, 2021, 110490, <https://doi.org/10.1016/J.RSER.2020.110490>.
- [13] Cuéllar Franca R.M., Azapagic A., *Life cycle environmental impacts of carbon capture, storage, and utilization*, [w:] Abraham M.A. (ed.), *Encyclopedia of Sustainable Technologies*, vol. 3, Elsevier, 2017, s. 447–459, <https://www.doi.org/10.1016/B978-0-12-409548-9.10123-X>.
- [14] McGlashan N.R., Workman M.H.W., Caldecott B., Shah N., *Negative emissions technologies*, Grantham Institute for Climate Change Briefing paper No 8, <https://www.imperial.ac.uk/grantham/publications/briefing-papers/negative-emissions-technologies---grantham-briefing-paper-8.php> [dostęp: 5.11.2024].
- [15] *Negative Emissions Technologies and Reliable Sequestration. A Research Agenda*, The National Academies Press, Washington, D.C. 2019. <https://www.doi.org/10.17226/25259>.
- [16] Gonzalez Sanchez R., Chatzipanagi A., Kakoulaki G., Buffi M., Szabo S., *The role of direct air capture in EU's decarbonisation and associated carbon intensity for synthetic fuels production*, Energies, vol. 16, iss. 9, 2023, 3881, <https://www.doi.org/10.3390/en16093881>.
- [17] Minx J.C., Lamb W.F., Callaghan M.W., Fuss S., Hilaire J., Creutzig F., Amann T., Beringer T., de Oliveira Garcia W., Hartmann J., *Negative emissions – Part 1: Research landscape and synthesis*, Environmental Research Letters, vol. 13, no. 6, 2018, 063001, <https://www.doi.org/10.1088/1748-9326/AABF9B>.
- [18] Budinis S., *Going carbon negative: What are the technology options?*, 2020, <https://www.iea.org/commentaries/going-carbon-negative-what-are-the-technology-options> [dostęp: 29.11.2024].
- [19] IEAGHG, *Global Assessment of Direct Air Capture Cost*, 2021, <https://ieaghg.org/publications/global-assessment-of-direct-air-capture-costs/>.
- [20] IEA, *Direct Air Capture 2022: A key technology for net zero*, 2022, <https://www.iea.org/reports/direct-air-capture-2022> [dostęp: 2.11.2024].
- [21] Heidarinejad Z., Dehghani M.H., Heidari M., Javedan G., Ali I., Sillanpää M., *Methods for preparation and activation of activated carbon: a review*, Environmental Chemistry Letters, vol. 18, iss. 2, 2020, s. 393–415, <https://www.doi.org/10.1007/S10311-019-00955-0>.
- [22] Marsh H., Rodríguez-Reinoso F., *Chapter 2 – Activated Carbon (Origins)*, [w:] Marsh H., Rodríguez-Reinoso F., *Activated Carbon*, Elsevier, 2006, s. 13–86. <https://www.doi.org/10.1016/B978-008044463-5/50016-9>.
- [23] Gan Y.X., *Activated Carbon from Biomass Sustainable Sources*, C: Journal of Carbon Research, vol. 7, iss. 2, 2021, 39, <https://www.doi.org/10.3390/C7020039>.
- [24] Pourhakkak P., Taghizadeh A., Taghizadeh M., Ghaedi M., Haghdoust S., *Chapter 1 – Fundamentals of adsorption technology*, [w:] Ghaedi M. (ed.), *Adsorption: Fundamental Processes and Applications*, Elsevier, 2021, s. 1–70, „Interface Science and Technology”, vol. 33, <https://www.doi.org/10.1016/B978-0-12-818805-7.00001-1>.

- [25] Noble R.D., Terry P.A., 7 – *Adsorption*, [w:] Noble R.D., Terry P.A., *Principles of Chemical Separations with Environmental Applications*, Cambridge University Press, 2004, s. 182–213, <https://www.doi.org/10.1017/CBO9780511616594.008>.
- [26] Lozano-Castelló D., Cazorla-Amorós D., Linares-Solano A., Quinn D.F., *Activated carbon monoliths for methane storage: influence of binder*, *Carbon*, vol. 40, iss. 15, 2002, s. 2817–2825, [https://www.doi.org/10.1016/S0008-6223\(02\)00194-X](https://www.doi.org/10.1016/S0008-6223(02)00194-X).
- [27] Ibeh P.O., García-Mateos F.J., Rosas J.M., Rodríguez-Mirasol J., Cordero T., *Activated carbon monoliths from lignocellulosic biomass waste for electrochemical applications*, *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, vol. 97, 2019, s. 480–488, <https://www.doi.org/10.1016/J.JTICE.2019.02.019>.
- [28] Steldinger H., Esposito A., Brunnengräber K., Gläsel J., Etzold B.J.M., *Activated carbon in the third dimension – 3D printing of a tuned porous carbon*, *Advanced Science*, vol. 6, iss. 19, 2019, 1901340, <https://www.doi.org/10.1002/ADVS.201901340>.
- [29] Bian B., Shi D., Cai X., Hu M., Guo Q., Zhang Ch., Wang Q., Sun A.X., Yang J., *3D printed porous carbon anode for enhanced power generation in microbial fuel cell*, *Nano Energy*, vol. 44, 2018, s. 174–180, <https://www.doi.org/10.1016/J.NANOEN.2017.11.070>.

Jadwiga Hyla*

ANALIZA MOŻLIWOŚCI BUDOWY SOCZEWKI AKUSTYCZNEJ Z WYKORZYSTANIEM METAMATERIAŁÓW AKUSTYCZNYCH

Soczewkami akustycznymi określa się struktury umożliwiające skupianie fal dźwiękowych, które przez nie przenikają. Znajdują one szerokie zastosowanie m.in. w medycynie, ponieważ mogą służyć do kształtowania fali ultradźwiękowej. Przedstawiony w artykule problem dotyczy natomiast soczewki projektowanej dla niższego zakresu częstotliwości, w przypadku której manipulacja falą przenikającą wymaga uwzględnienia innych parametrów i większych wymiarów soczewki. W pracy omówiono przeprowadzone badania nad możliwością budowy soczewki z wykorzystaniem periodycznie rozmieszczonych elementów akustycznych tworzących strukturę metamateriałową, takich jak rezonatory Helmholtza. W celu doboru prawidłowych parametrów i wymiarów elementów struktury soczewki wykorzystano metodę optymalizacji roju cząstek (PSO – *particle swarm optimization*) oraz przeprowadzono algorytmizację całego procesu wyznaczania niezbędnych parametrów.

ANALYSIS OF THE UTILIZATION OF ACOUSTIC METAMATERIALS FOR THE CONSTRUCTION OF AN ACOUSTIC LENS

Acoustic lenses are systems designed to focus acoustic waves passing through them. They find widespread applications, particularly in medicine, for manipulating ultrasonic acoustic waves. However, the problem addressed in this lecture pertains to a lens designed for lower frequency ranges, where manipulating the incident wave requires consideration of different parameters and larger lens dimensions. The study explores the feasibility of constructing a lens using periodically arranged acoustic elements, such as Helmholtz resonators, forming a metamaterial structure. To select appropriate parameters and geometric dimensions of the system, the particle swarm optimization (PSO) method was employed, and the entire process of determining the required parameters was algorithmized.

1. WPROWADZENIE

Soczewka akustyczna to ustrój służący do zmiany zbieżności wiązki fal dźwiękowych przenikających przez jej strukturę [1]. Soczewki są zwykle wykorzystywane do otrzymywania wiązek ultradźwiękowych o dużej energii. W przypadku zakresu fal słyszalnych zazwyczaj stosowane są soczewki rozpraszające, pełniące funkcję elementu dodatkowego w głośnikach odbiorników radiowych.

* AGH Akademia Górniczo-Hutnicza, Wydział Inżynierii Mechanicznej i Robotyki, Koło Naukowe Akustyki Architektonicznej

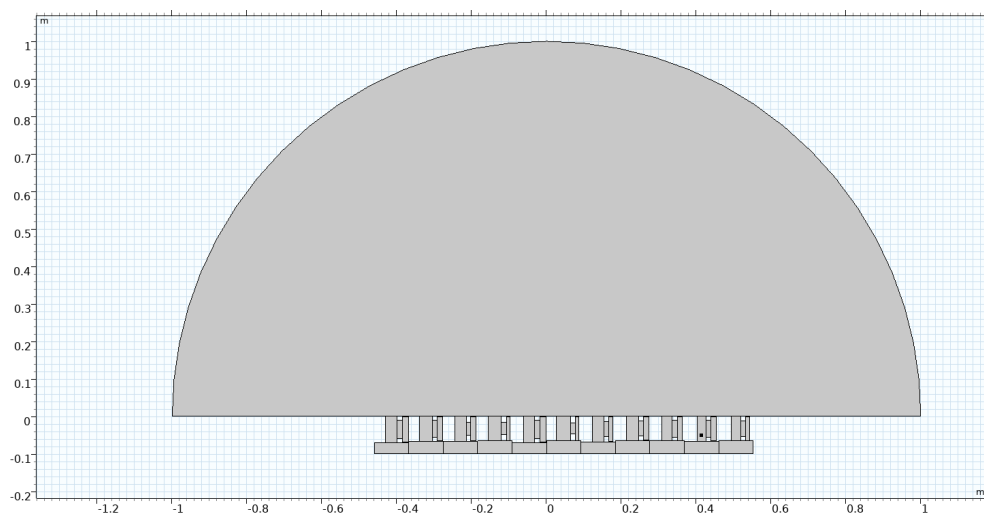
W ramach projektu dokonano analizy możliwości optymalizacji geometrii soczewki skupiającej zbudowanej z metamateriałów akustycznych [2, 3]. Przeanalizowano różne warianty parametryzacji komórek metamateriałowych złożonych z kanału głównego z dołączonym równolegle rezonatorem Helmholtza, który odpowiadał za manipulację padającą falą akustyczną [4].

W procesie optymalizacji komórek metamateriałowych parametrami, które należało odpowiednio dobrać, były współczynnik przenikania dźwięku oraz opóźnienie fazowe. W czasie badania wykorzystano algorytm optymalizacji metodą roju cząstek (PSO – *particle swarm optimization*), który umożliwia minimalizację zaimplementowanych funkcji kosztu [5, 6]. Analizę oraz optymalizację struktury przeprowadzono dla częstotliwości wynoszącej 1700 Hz, a całą procedurę obliczeniową wykonano z wykorzystaniem modeli numerycznych opracowanych w środowisku COMSOL Multiphysics. Optymalizację przeprowadzono za pomocą języka MATLAB [7].

2. OPIS METODYKI BADAŃ

2.1. MODELE NUMERYCZNE STRUKTURY SOCZEWKI I KOMÓREK METAMATERIAŁOWYCH

Optymalizację geometrii analizowanych struktur wykonano z wykorzystaniem metody elementów skończonych (MES). Całkowity model składał się z 11 komórek powietrza wraz z dołączonymi rezonatorami Helmholtza. Przed przystąpieniem do procedury optymalizacji przeprowadzono dodatkowe analizy wymiarów pojedynczych komórek, a także wstępne obliczenia, które pozwoliły określić najbardziej odpowiednie parametry komórek powietrza oraz czasochłonność całego procesu. Dokonano także weryfikacji informacji dotyczących optymalizacji i parametrów geometrycznych rezonatorów Helmholtza uzyskanych na podstawie wcześniejszego przeglądu literaturowego [8].



Rys. 1. Geometria modelu numerycznego optymalizowanej struktury soczewki akustycznej

Na podstawie wstępnych obliczeń wykazano, że ze względu na dużą liczbę parametrów optymalizacja z wykorzystaniem metody elementów skończonych jest czasochłonna, co może utrudnić wykonanie analizy. Optymalizację podzielono na etapy, a pełnowymiarowy model przedstawiony na rysunku 1 wykorzystano do końcowej weryfikacji przeprowadzonych obliczeń.

2.2. ETAPY OPTYMALIZACJI SOCZEWKI AKUSTYCZNEJ

Ze względu na czasochłonność optymalizacji całej struktury soczewki akustycznej z wykorzystaniem MES cały proces podzielono na trzy etapy:

1. Optymalizacja modelu teoretycznego w celu uzyskania wymaganych wartości współczynnika przenikania dźwięku i opóźnienia fazowego.
2. Optymalizacja geometrii poszczególnych komórek zgodnie z wynikami uzyskanymi na etapie 1 w celu wyznaczenia wymiarów geometrycznych.
3. Weryfikacja pełnowymiarowego modelu.

Etap 1 przeprowadzono z wykorzystaniem modelu teoretycznego do wyznaczania rozkładu ciśnienia akustycznego w przestrzeni wokół soczewki. W efekcie uzyskano wymagane wartości parametrów charakteryzujących poszczególne komórki. Na etapie 2 przeprowadzono natomiast optymalizację geometrii samych komórek z uwzględnieniem parametrów z etapu 1, które na etapie 3 pozwoliły na analizę pełnej struktury soczewki.

2.3. OPIS MODELU OBLICZENIOWEGO WYKORZYSTANEGO NA ETAPIE 1 OPTYMALIZACJI

Etap 1 obejmował przygotowanie teoretycznego modelu soczewki, który zwracał wartość ciśnienia akustycznego przestrzeni w promieniu 5 m od struktury. Parametrami, które wpływały na uzyskany wynik, były częstotliwość, liczba komórek powietrza, szerokość pojedynczej komórki oraz zespolony współczynnik przenikania dźwięku T . Założono, że moduł współczynnika przenikania dźwięku $|T|$ powinien wynosić od 0,3 do 0,7, natomiast opóźnienie fazowe (argument T) powinno mieścić się w zakresie od $-\pi$ do π .

Następnie na podstawie założonych parametrów wyznaczano wartość ciśnienia akustycznego dla określonej częstotliwości i położenia kąтового w przestrzeni nad soczewką:

$$p_s = -\frac{ik}{8\pi^2} \cdot e^{-ik(r+r_0)} \cdot \sin c\left(\frac{kb}{r}\right) \cdot (\cos\theta + 1) \int_{x_s \min}^{x_s \max} T e^{ik \cdot x_s \sin\theta} dx_s \quad (1)$$

gdzie:

- p_s – ciśnienie akustyczne fali odbitej dla rozważanego modelu teoretycznego [–],
- k – liczba falowa równa $2\pi f/c$ [1/m],
- r – odległość mikrofonów od próbki [m],
- r_0 – odległość źródła dźwięku od próbki [m],
- b – połowa szerokości rozpraszacza [m],
- θ – kąt analizy odbicia fali dźwiękowej (założono, że mieści się między $-\pi/2$ a $\pi/2$) [rad],
- x_s – pozycja wzdłuż osi x [m],
- T – zespolony współczynnik przenikania dźwięku [–].

W celach porównawczych przygotowano model teoretyczny, który dla wszystkich komórek zakładał stałe wartości modułu współczynnika przenikania dźwięku T oraz stałe przesunięcie fazowe φ , co odpowiadało fali płaskiej po przejściu przez strukturę.

Celem optymalizacji przeprowadzonej na etapie 1 było wyznaczenie wartości współczynnika przenikania dźwięku oraz opóźnienia fazowego. Funkcja kosztu została zaimplementowana jako pierwiastek wartości błędu średniokwadratowego między wynikami znormalizowanego ciśnienia akustycznego obliczonego w modelu teoretycznym a wektorem referencyjnym ciśnienia akustycznego:

$$k_{\text{etap1}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \text{rms}(|p_s| - p_{\text{ref}}) \quad (2)$$

gdzie:

- k_{etap1} – wartość funkcji kosztu na etapie 1,
- n – liczba odbiorników na obszarze odczytu równa 181,
- $|p_s|$ – znormalizowany wektor wartości bezwzględnych odczytanego ciśnienia akustycznego dla modelu teoretycznego soczewki [–],
- p_{ref} – wektor referencyjny [–].

Jako wektor referencyjny przyjęto wektor znormalizowanego ciśnienia akustycznego, którego wartości maksymalne mieszczą się w zakresie od -5° do 5° i przyjmują znormalizowaną wartość amplitudy równą 1, natomiast w przypadku reszty rozpatrywanego obszaru przyjęto wartości minimalne wynoszące 0.

Funkcja kosztu była minimalizowana, a parametrami podlegającymi optymalizacji były odpowiednio znormalizowane współczynnik przenikania dźwięku τ oraz opóźnienie fazowe φ . Rozdzielczość kątowa odczytywanych wartości ciśnienia akustycznego wynosiła 1° .

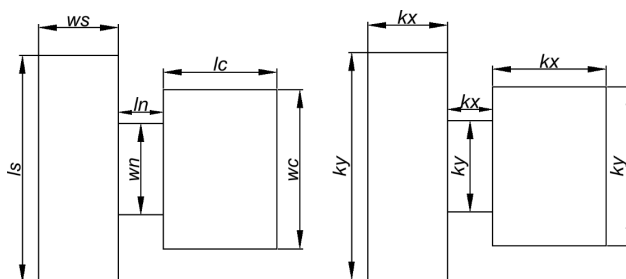
2.4. OPIS MODELI OBLICZENIOWYCH WYKORZYSTANYCH NA ETAPIE 2 OPTYMALIZACJI

Po zakończeniu procesu optymalizacji na etapie 1 z wykorzystaniem metody elementów skończonych (MES) przygotowano modele numeryczne, które uwzględniały rozpatrywaną geometrię pojedynczej komórki. Na potrzeby badań przygotowano dwa warianty modeli komórek metamateriałowych złożonych z kanału i rezonatorów Helmholtza. Modele obejmowały komórkę powietrza dołączoną do wlotu kanału, optymalizowaną geometrię rezonatora oraz komórkę powietrza dołączoną do wylotu.

W przypadku 2-elementowej parametryzacji geometrii rezonatorów Helmholtza wartości optymalizowane k_x oraz k_y skalowały odpowiednio szerokość i długość każdego z elementów rezonatora. Powodowało to powstanie ograniczeń w manipulacji geometrią, jednak znacznie skracало czas optymalizacji pełnej struktury. Dzięki narzuconym parametrom model był skalowany, a jego poszczególne elementy zmieniały się proporcjonalnie względem siebie. W tabeli 1 oraz na rysunku 2 przedstawiono zależności między parametrami rezonatora oraz wartościami optymalizowanymi.

Tabela 1. Opisanie parametrów rezonatorów za pomocą parametrów optymalizacyjnych k dla 2-elementowej parametryzacji rezonatora Helmholtza

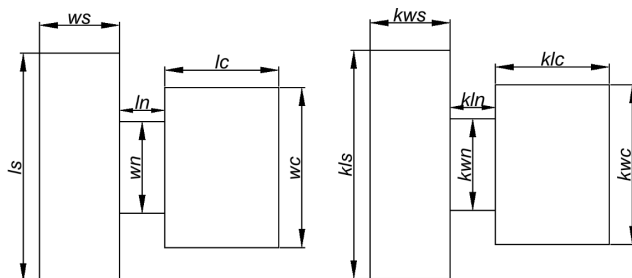
Parametr	Oznaczenie	Wartości opisujące parametr [m]
Długość szczeliny głównej	ls	$0,055ky + 0,015$
Szerokość szczeliny głównej	ws	$(lt - lc - 0,005)kx + 0,010$
Długość szyjki rezonatora	ln	$(lt - lc - ws - 0,002)kx + 0,013$
Szerokość szyjki rezonatora	wn	$(wc - 0,020)ky + 0,011$
Długość jamy rezonatora	lc	$(lt - 0,008)kx + 0,008$
Szerokość jamy rezonatora	wc	$ls - 0,002$
Parametr pomocniczy	lt	$0,060ky + 0,017$

**Rys. 2.** Parametry rezonatora Helmholtza oraz współczynniki optymalizowane dla danego wymiaru rozpatrywanej geometrii (parametryzacja 2-elementowa)

Drugim rozpatrywanym modelem geometrii rezonatora Helmholtza była 6-elementowa parametryzacja. W tym przypadku każdej długości oraz szerokości szczeliny głównej (ls , ws), szyjki rezonatora (ln , wn) oraz komory rezonatora (lc , wc) odpowiada parametr k sterujący wartościami geometrii. Zależności między wymiarami falowodu zostały przedstawione w tabeli 2 oraz na rysunku 3. Zestawienie dwóch sposobów optymalizacji dla identycznej geometrii pozwoliło na porównanie wpływu liczby optymalizowanych parametrów na jakość uzyskanych wyników.

Tabela 2. Opisanie parametrów rezonatorów za pomocą parametrów optymalizacyjnych k dla 6-elementowej parametryzacji rezonatora Helmholtza

Parametr	Oznaczenie	Wartości opisujące parametr [m]
Długość szczeliny głównej	ls	$0,055kls + 0,015$
Szerokość szczeliny głównej	ws	$(lt - lc - 0,010)kws + 0,015$
Długość szyjki rezonatora	ln	$(lt - lc - ws - 0,005)kln + 0,014$
Szerokość szyjki rezonatora	wn	$(wc - 0,020)kwn + 0,0075$
Długość jamy rezonatora	lc	$(lt - 0,010)klc + 0,003$
Szerokość jamy rezonatora	wc	$ls - 0,002$
Parametr pomocniczy	lt	$0,040kt + 0,017$



Rys. 3. Parametry rezonatora Helmholtza oraz współczynniki optymalizowane dla danego wymiaru rozpatrywanej geometrii (parametryzacja 6-elementowa)

W przypadku obydwu geometrii rezonatora Helmholtza szerokość pojedynczej komórki wynosiła 0,09 m. Taki model umożliwił wyznaczenie zespolonego współczynnika przenikania dźwięku T jako ilorazu ciśnienia wylotu do ciśnienia wlotu rezonatora. Następnie wyznaczony współczynnik wykorzystano do wyliczenia współczynnika przenikania dźwięku τ jako modułu z T [9] oraz opóźnienia fazowego jako argumentu zespolonej wartości T wyrażanego w radianach. Współczynnik przenikania dźwięku obliczono ze wzoru:

$$\tau = \left| \frac{p_{\text{out}}}{p_{\text{in}}} \right| \quad (3)$$

gdzie:

- τ – współczynnik przenikania dźwięku [–],
- p_{out} – wartość ciśnienia akustycznego na krawędzi wyjściowej soczewki [Pa],
- p_{in} – wartość ciśnienia akustycznego na krawędzi wejściowej soczewki [Pa].

Opóźnienie fazowe jest natomiast wyrażane jako:

$$\varphi = \arg(T) \quad (4)$$

gdzie:

- φ – opóźnienie fazowe [rad],
- T – zespolony współczynnik przenikania dźwięku [–].

Na etapie 2 wykorzystano wartości współczynnika przenikania dźwięku oraz opóźnienia fazowego wyznaczone na etapie 1. Funkcja kosztu była minimalizowana, a wzór służący do jej wyznaczenia uwzględnia pierwiastek błędu średniokwadratowego będący różnicą między wartościami wyznaczonymi na etapie 1 dla τ oraz φ a wartościami odczytanymi z modelu dla optymalizowanej geometrii:

$$k_{\text{etap2}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \sqrt{\frac{1}{2} ((\tau_{\text{mod}} - \tau_{\text{etap1}})^2 + (\varphi_{\text{mod}} - \varphi_{\text{etap1}})^2)} \quad (5)$$

gdzie:

- k_{etap2} – wartość funkcji kosztu na etapie 2,
- n – liczba odbiorników na obszarze odczytu równa 181,
- τ_{mod} – wartość współczynnika przenikania dźwięku odczytana z optymalizowanego modelu,
- τ_{etap1} – wartość współczynnika przenikania dźwięku wyznaczona na etapie 1 dla danej optymalizowanej komórki,
- φ_{mod} – opóźnienie fazowe odczytane z optymalizowanego modelu [rad],
- φ_{etap1} – opóźnienie fazowe wyznaczone na etapie 1 dla danej optymalizowanej komórki [rad].

3. WYNIKI

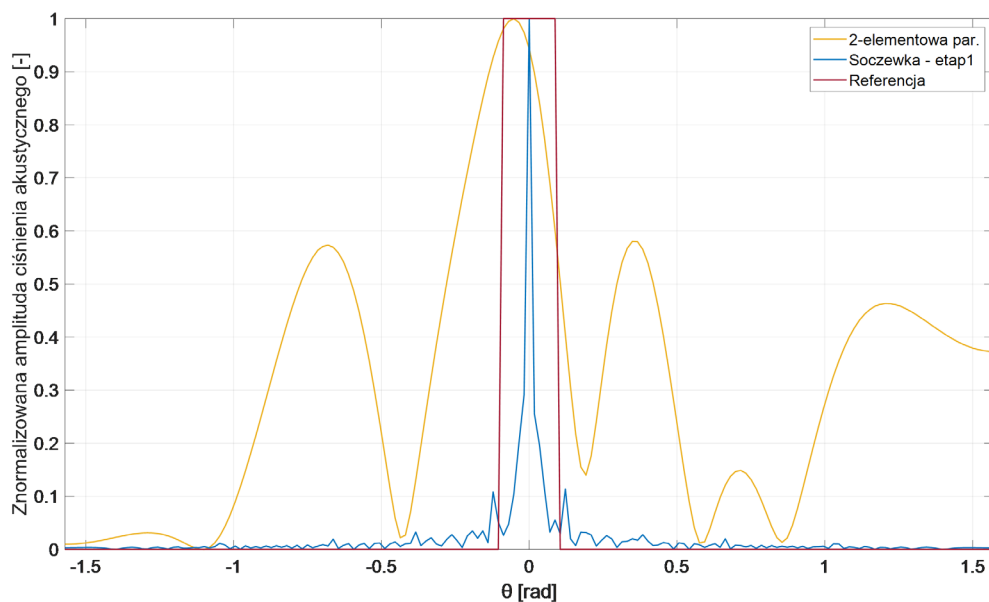
Analizę uzyskanych wyników przeprowadzono na podstawie porównania charakterystyk kierunkowości znormalizowanego ciśnienia akustycznego obliczonych z pełnowymiarowego modelu soczewki akustycznej dla zoptymalizowanych na etapie 2 geometrii komórek z charakterystykami wyznaczonymi na etapie 1 i z wektorem referencyjnym. Przedstawiono również porównanie rozkładów poziomu ciśnienia akustycznego z wynikami dla fali płaskiej dla każdego wariantu.

3.1. WYNIKI OBLICZEŃ DLA 2-ELEMENTOWEJ PARAMETRYZACJI

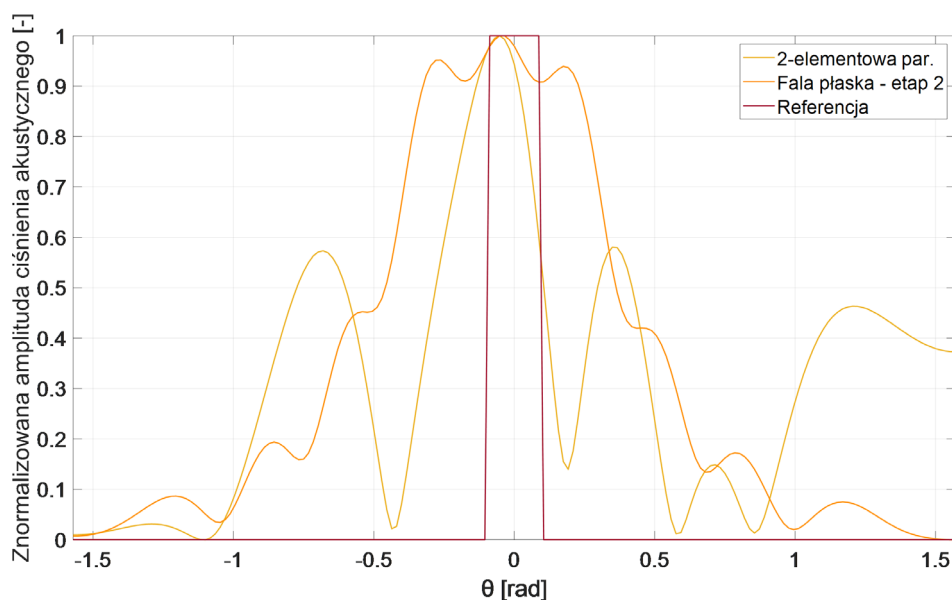
Wykres charakterystyki kierunkowości dla 2-elementowej parametryzacji wskazuje na skupienie wiązki fali akustycznej na obszarze odczytu w okolicach 0° z niewielkim przechYLENIEM w kierunku ujemnych wartości kątowych. Ponadto uzyskano dwie dodatkowe wiązki fali akustycznej, których znaczenie jest mniejsze niż wiązki głównej. Zaobserwowano także niewielki przeciek w okolicach 90° w kierunku dodatnim.

Na wykresie przedstawionym na rysunku 4 widoczna jest znaczna różnica między wynikiem uzyskanym na etapie 1 a wynikiem z etapu 2. Zarówno w przypadku modelu teoretycznego (etap 1), jak i weryfikowanej struktury (etap 2) obserwuje się listki boczne, które w przypadku etapu 1 są nieznaczne. Wartości otrzymane dla badanej geometrii osiągają maksimum w zakresie wektora referencyjnego, jednak są widocznie przesunięte w stronę ujemnych wartości kąta. Dodatkowe wiązki fali akustycznej uzyskują wartości powyżej 0,5, natomiast dodatkowy przeciek na skraju soczewki wynosi około 0,45.

Porównując uzyskane wyniki z rozkładem dla fali płaskiej, obserwujemy znaczne skupienie wiązki fali w planowanym punkcie (rys. 5). Wartości na listkach bocznych są wyższe niż dla fali płaskiej, szczególnie w przypadku wartości ujemnych kąta odczytu θ . Na obserwowanym przecieku na granicy obszaru odczytu uzyskane wartości są znacząco wyższe niż dla fali płaskiej. Porównując otrzymany wynik z wynikiem dla fali płaskiej, można zauważyć, że wiązka fali akustycznej osiągnęła znaczne skupienie.

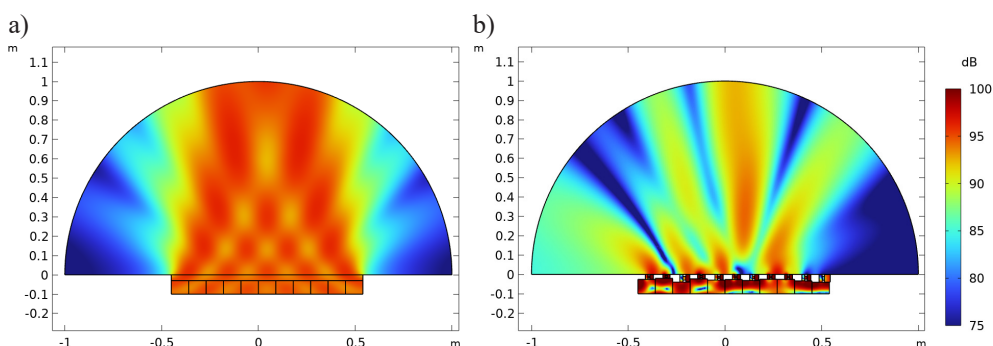


Rys. 4. Porównanie znormalizowanych charakterystyk kierunkowości ciśnienia akustycznego dla etapu 1 oraz wektora referencyjnego soczewki zoptymalizowanej na etapie 2 złożonej z komórek o 2-elementowej parametryzacji rezonatorów Helmholtza



Rys. 5. Porównanie znormalizowanych charakterystyk kierunkowości ciśnienia akustycznego dla fali płaskiej, wektora referencyjnego oraz soczewki zoptymalizowanej na etapie 2 złożonej z komórek o 2-elementowej parametryzacji rezonatorów Helmholtza

Przedstawione na rysunku 6 rozkłady pozwalają na dokładną obserwację manipulacji wiązką fali akustycznej za pomocą komórek metamateriałowych z rezonatorami Helmholtza. Wartości maksymalne osiąganę w przypadku rozkładów dla fali płaskiej oraz zoptymalizowanej struktury nie różnią się znacząco. Widoczna jest wiązka główna, której energia jest znacząco wyższa niż w przypadku pozostałych wiązek określanych jako listki boczne.



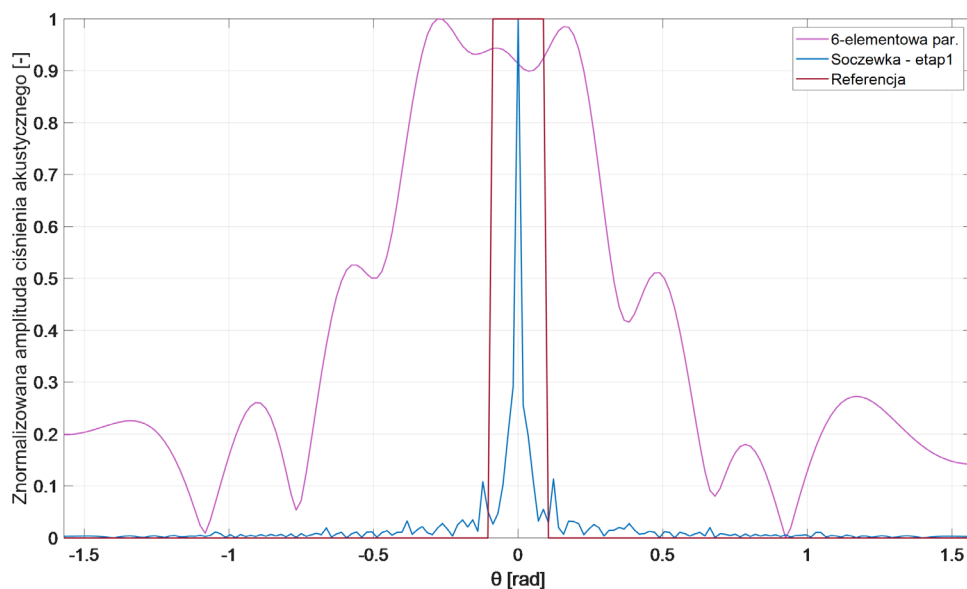
Rys. 6. Rozkład poziomy ciśnienia akustycznego dla fali płaskiej (a) oraz soczewki zoptymalizowanej na etapie 2 złożonej z komórek o 2-elementowej parametryzacji rezonatorów Helmholtza (b)

3.2. WYNIKI OBLICZEŃ DLA 6-ELEMENTOWEJ PARAMETRYZACJI

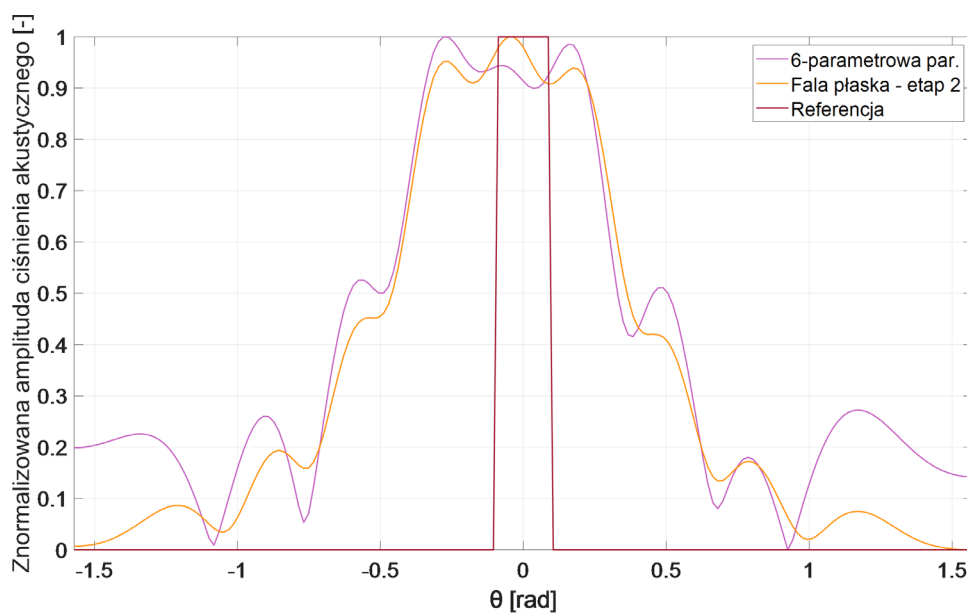
Wynik dla zoptymalizowanej struktury znacząco różni się od wartości uzyskanych dla modelu teoretycznego na etapie 1 (rys. 7). Nie obserwuje się skupienia wiązki dla kąta 0° oraz w zakresie wektora referencyjnego. Maksymalne skupienie występuje w zakresie, który nie pokrywa się z wartościami maksymalnymi referencji. Ponadto widoczne są dodatkowe listki boczne dla θ równego około 0,5 oraz jego odbicia lustrzanego, gdzie wartość znormalizowanej amplitudy ciśnienia akustycznego przekracza 0,5.

Porównując zoptymalizowaną strukturę z rozkładem dla fali płaskiej, można zauważyć widoczne podobieństwo (rys. 8). Wartości dla 6-parametrowego rezonatora Helmholtza są znacząco wyższe w obszarze poza wektorem referencyjnym, natomiast dla kąta 0° wartości modelu fali płaskiej pozytywnie wyróżniają strukturę.

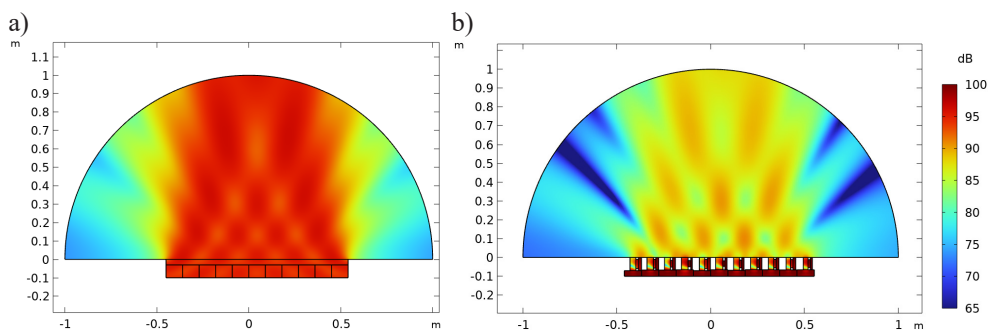
Rozkłady poziomów ciśnienia akustycznego dla rozpatrywanych modeli przedstawionych na rysunku 9 wskazują na wysokie podobieństwo obydwu przypadków, przy czym dla modelu 6-elementowej parametryzacji wartości poziomu ciśnienia akustycznego w obszarze maksymalnych wartości są znacząco niższe niż w przypadku fali płaskiej. Wskazuje to na obniżoną wartość współczynnika przenikania wypromieniowanej ze strony komórki powietrza fali płaskiej.



Rys. 7. Porównanie znormalizowanych charakterystyk kierunkowości ciśnienia akustycznego dla etapu 1 oraz wektora referencyjnego soczewki zoptymalizowanej na etapie 2 złożonej z komórek o 6-elementowej parametryzacji rezonatorów Helmholtza



Rys. 8. Porównanie znormalizowanych charakterystyk kierunkowości ciśnienia akustycznego dla fali płaskiej, wektora referencyjnego oraz soczewki zoptymalizowanej na etapie 2 złożonej z komórek o 6-elementowej parametryzacji rezonatorów Helmholtza



Rys. 9. Rozkład poziomu ciśnienia akustycznego dla modelu fali płaskiej (a) oraz soczewki zoptymalizowanej na etapie 2 złożonej z komórek o 6-elementowej parametryzacji rezonatorów Helmholtza (b)

4. PODSUMOWANIE

Przyjęta metoda optymalizacji umożliwiła przeprowadzenie dodatkowej analizy, a w konsekwencji dobór prawidłowych parametrów wstępnych, takich jak liczba komórek powietrza oraz ich szerokość. Na etapie 1 wykorzystano jedynie model teoretyczny, przez co czas niezbędny do wykonania optymalizacji był skrócony do maksymalnie kilkudziesięciu sekund na rozpatrywany wariant. Pozwoliło to na analizę wielu możliwości i wybranie spośród nich najlepszych.

Na etapie 2, polegającym na optymalizacji poszczególnych komórek z wybranymi geometriami, nie było możliwe skrócenie czasu obliczeń, jednak ze względu na ich przeprowadzanie fragmentarycznie dla kolejnych komórek ewentualne problemy wynikające z czynników zewnętrznych nie zaburzały całości procesu optymalizacji, a jedynie obliczenia dla konkretnej pozycji.

Wyniki optymalizacji wykonanej na etapie 2 zweryfikowane w pełnowymiarowych modelach dla poszczególnych geometrii wskazują na skuteczność etapowej metody optymalizacji struktury soczewki złożonej z metamateriałów zbudowanych z wykorzystaniem rezonatorów Helmholtza. W przypadku rozważanych wariantów parametryzacji komórek lepsze wyniki uzyskano dla parametryzacji 2-elementowej. Warianty te charakteryzowały się korzystniejszym skupieniem wiązki fali akustycznej w zakresie założonego kąta.

Praca pozwoliła na weryfikację postawionej tezy o możliwości budowy soczewki z zastosowaniem metamateriałów akustycznych. Dodatkowej weryfikacji wymaga możliwość optymalizacji z wykorzystaniem różnych geometrii komórek, aby usunąć ograniczenia związane ze współczynnikiem przenikania dźwięku (np. ekranowanie padającej fali akustycznej) czy opóźnienia fazowego.

LITERATURA

- [1] Pan Ch.-W., Kehn M.N.M., Quevedo-Teruel O., *Microwave focusing lenses by synthesized with positive or negative refractive index split-ring resonator metamaterials*, [w:] *2015 International Workshop on Electromagnetics: Applications and Student Innovation Competition (iWEM)*, IEEE, 2015, <https://www.doi.org/10.1109/iWEM.2015.7365057>.
- [2] Zhang S., *Acoustic metamaterial design and applications*, Dissertation, University of Illinois at Urbana-Champaign, 2010, https://www.google.com/url?sa=t&source=web&rct=j&opi=89978449&url=https://web.mit.edu/nanophotonics/projects/Dissertation_Shuh.pdf&ved=2ahUKewjx4oXLIqOAxW7UVUIHa6RFnIQFnoECBUQA-Q&usg=AOvVaw1CkIeS_r6NpNyljS8WQ9wT.
- [3] Cox T.J., D'Antonio P., *Acoustic Absorbers and Diffusers, Theory, Design and Application*, 2nd ed., Taylor & Francis, London – New York 2009.
- [4] Makarewicz R., *Dźwięki i fale*, Wydawnictwo Naukowe UAM, Poznań 2004.
- [5] Foryś P., *Zastosowanie metody roju cząstek w optymalnym projektowaniu elementów konstrukcji*, Czasopismo Techniczne. Mechanika, r. 105, z. 4-M, 2008, s. 31–42.
- [6] Heris M.K., *Particle Swarm Optimization in MATLAB*, 2015, <https://yarpiz.com/50/ypea102-particle-swarm-optimization> [dostęp: 14.01.2025].
- [7] Czajka I., Gołaś A., *Inżynierskie metody analizy numerycznej i planowanie eksperymentu*, Wydawnictwa AGH, Kraków 2017.
- [8] Dusza K., *Projekt panelu refleksyjnego do kształtowania pierwszych odbić dźwięku zbudowanego w oparciu o metamateriały akustyczne*, Praca dyplomowa magisterska, Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica w Krakowie, Wydział Inżynierii Mechanicznej i Robotyki, 2022.
- [9] Kinsler L.E., Frey A.R., Coppens A.B., Sanders J.V., *Fundamentals of Acoustics*, 4th ed., John Wiley & Sons, 2000.

JEDNOPUNKTOWE FORMOWANIE BLACH JAKO EFEKTYWNA METODA PRODUKCJI MAŁOSERYJNEJ I PROTOTYPOWANIA

W artykule przedstawiono projekt i wdrożenie nowoczesnego stanowiska do jednopunktowego przyrostowego formowania blach (*Single Point Incremental Forming*, SPIF) z wykorzystaniem przemysłowego ramienia robotycznego. Metoda SPIF umożliwia precyzyjne postępowe kształtowanie blach bez potrzeby stosowania kosztownych matryc i narzędzi, co czyni tę technologię idealnym rozwiązaniem w przypadku produkcji małoseryjnej i prototypowania. Podstawą metody jest stopniowe odkształcanie blachy przy użyciu trzpienia formującego, który porusza się zgodnie z zaplanowaną trajektorią. W tekście omówiono budowę i testowanie stanowisk laboratoryjnych, początkowo z zastosowaniem ramienia Dobot M1 Pro, a następnie przemysłowego ramienia Kawasaki RS030N. Odpowiednie, stworzone na potrzeby projektu, oprogramowanie sterujące pozwala na precyzyjne generowanie trajektorii i kontrolę procesu. Przeprowadzone wielokrotnie eksperymenty potwierdziły skuteczność technologii, np. brak wad takich jak pęknięcia materiału. Opracowane stanowisko może znaleźć zastosowanie w badaniach nad tłocznością materiałów, w nowoczesnych technologiach przemysłowych oraz w dydaktyce.

SINGLE POINT INCREMENTAL FORMING OF SHEET METAL AS AN EFFICIENT METHOD FOR SMALL-BATCH PRODUCTION AND PROTOTYPING

The article presents the design and implementation of a modern workstation for Single Point Incremental Forming (SPIF) of sheet metal using an industrial robotic arm. The SPIF method enables precise incremental shaping of sheet metal without the need for expensive dies and tools, making this technology an ideal solution for small-batch production and prototyping. The core principle of the method involves gradually deforming the sheet using a forming tool that follows a pre-programmed trajectory. The article discusses the construction and testing of laboratory workstations, initially using a Dobot M1 Pro arm, and later an industrial Kawasaki RS030N arm. Dedicated control software developed for the project allows for precise trajectory generation and process control. Numerous experiments confirmed the effectiveness of the technology, with no defects such as material cracks observed. The developed workstation can be applied in research on material formability, in modern industrial technologies, and in education, supporting the development of innovative manufacturing methods.

1. WSTĘP

W dobie dynamicznego rozwoju społeczeństwa zapotrzebowanie na niestandardowe wyroby metalowe jest coraz bardziej widoczne w różnych obszarach życia. Szczególnie jest to

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

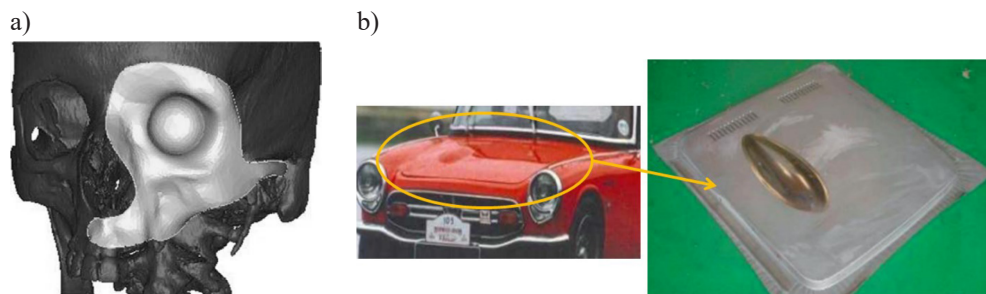
** AGH Akademia Górniczo-Hutnicza, Wydział Inżynierii Metali i Informatyki Przemysłowej, Koło Naukowe Przeróbki Plastycznej Metali „Hefajstos”

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

zauważalne w przypadku cienkościennych wyrobów metalowych, często o bardzo złożonym kształcie, które znajdują zastosowanie np. w architekturze, w renowacji samochodów zabytkowych, w branży reklamowej itp. Niestety takich wyrobów nie potrzeba wiele – raczej są to produkty o unikatowym charakterze. Kwestie związane z ekonomicznymi aspektami wytwarzania tych produktów odgrywają kluczową rolę [1–4].

Standardowe technologie przeróbki plastycznej blach, takie jak tłoczenie, wymagają opracowania odpowiednich kompletów dwóch lub więcej narzędzi roboczych (w przypadku standardowego tłoczenia – matrycy dolnej, matrycy górnej (najczęściej stempla) oraz dociskacza) o odpowiedniej trwałości ze względu na występujące naciski w procesie. Koszty tych technologii rosną ze względu na wspomniany bardzo skomplikowany kształt wyrobu gotowego, który należy uzyskać. W przypadku produkcji wielkoseryjnej wspomniane koszty są uzasadnione, jednak w przypadku małoseryjnej lub jednostkowej (np. elementy indywidualnych protez medycznych) są nie do zaakceptowania. Rozwiązaniem wspomnianych problemów powstających podczas małoseryjnej produkcji wyrobów z blachy arkuszowej jest technologia jednopunktowego przyrostowego formowania SPIF (*Single Point Incremental Forming*). Wówczas stosowany jest trzpień, zainstalowany na ramieniu robotycznym, który pozwala punktowo odkształcać plastycznie materiał, formując go w dowolne wymagane kształty, bez konieczności stosowania dodatkowych narzędzi.

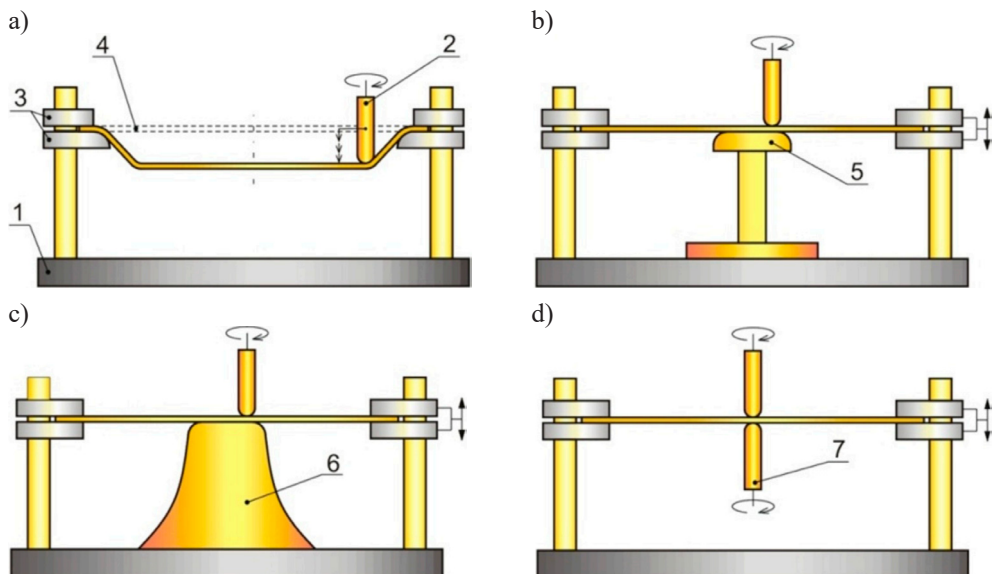
W porównaniu z konwencjonalnymi metodami tłoczenia wykorzystanie tej technologii znacząco zmniejsza koszty i liczbę narzędzi oraz redukuje czas potrzebny do uzyskania pierwszego gotowego komponentu. Przykłady zastosowania SPIF zaprezentowano na rysunku 1.



Rys. 1. Przykłady zastosowania wyrobów wykonanych technologią jednopunktowego przyrostowego formowania blach:

a) implanty w przemyśle medycznym; b) części zabytkowych samochodów [3, 4]

W procesie SPIF wykorzystywany jest trzpień, który wykonuje ruch o ściśle określonej, wcześniej zaplanowanej trajektorii i formuje arkusz blachy, sztywno zamocowany za pomocą ramy i dociskacza (rys. 2a). Dzięki temu możliwe jest formowanie detali o zróżnicowanym kształcie bez używania specjalnie do tego celu przygotowanych stempla i matrycy. W zależności od potrzeb można zastosować dodatkowe narzędzia w postaci matryc (rys. 2b, c) lub drugiego narzędzia formującego (rys. 2d). Zadaniem tych elementów konstrukcyjnych jest dokładniejsza kontrola grubości blachy i umożliwienie wykonywania wyrobów o bardziej skomplikowanych kształtach.



Rys. 2. Wybrane rodzaje procesu punktowego formowania blach:

- a) standardowy proces SPIF; b) z matrycą składaną; c) z matrycą monolityczną;
 d) z wykorzystaniem dwóch trzpieni formujących; 1 – stół mocujący, 2 – trzpień formujący,
 3 – rama i dociskacz, 4 – blacha wsadowa, 5 – matryca składana, 6 – matryca monolityczna,
 7 – trzpień pomocniczy [5]

W niniejszym artykule przedstawiono proces projektowania i budowy stanowisk laboratoryjnych do jednopunktowego przyrostowego formowania blach z wykorzystaniem półprzemysłowego ramienia robotycznego Dobot M1 Pro i przemysłowego Kawasaki RS030N.

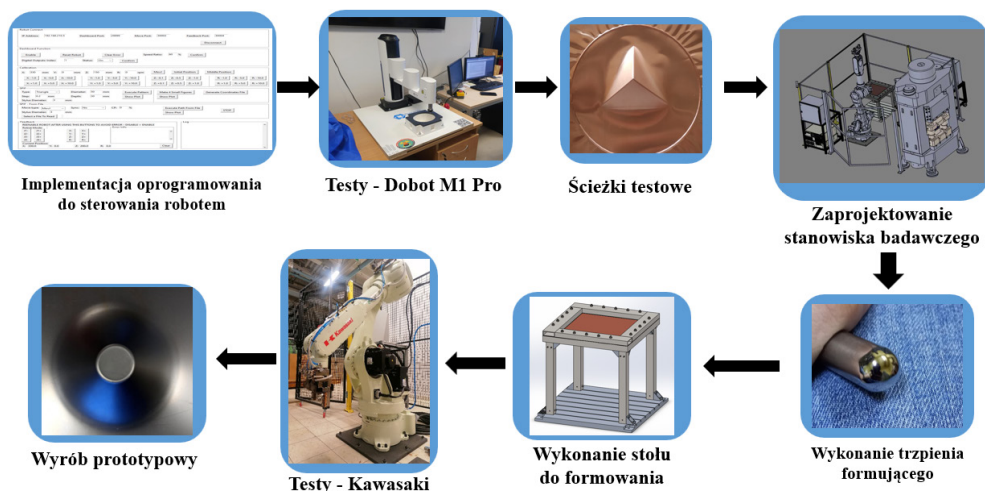
2. METODYKA BADAWCZA

Prowadzone badania zostały podzielone na dwie główne części: część pierwsza – związana z projektowaniem i wykonaniem stanowiska oraz część druga – dotycząca przygotowania oprogramowania sterującego. Początkowe prace wykonywano na stanowisku półprzemysłowym, gdzie testowano różne rozwiązania w mniejszej skali. Następnie zoptymalizowany proces został przeniesiony do skali przemysłowej.

2.1. PROJEKT I BUDOWA STANOWISKA DO JEDNOPUNKTOWEGO FORMOWANIA

Na pierwszym etapie projektu wykonano stanowisko z zastosowaniem ramienia robotycznego Dobot M1 Pro, które posłużyło do wstępnego zaprojektowania procesu SPIF oraz pozwoliło na stworzenie specjalnego oprogramowania do sterowania trajektorią ruchu trzpienia formującego. Po wykonaniu wielu testów na cienkich blachach (0,1 mm) z materiałów dobrze odkształcalnych, takich jak miedź (M1Ez4) czy mosiądz (M63z4), zaprojektowano docelowe

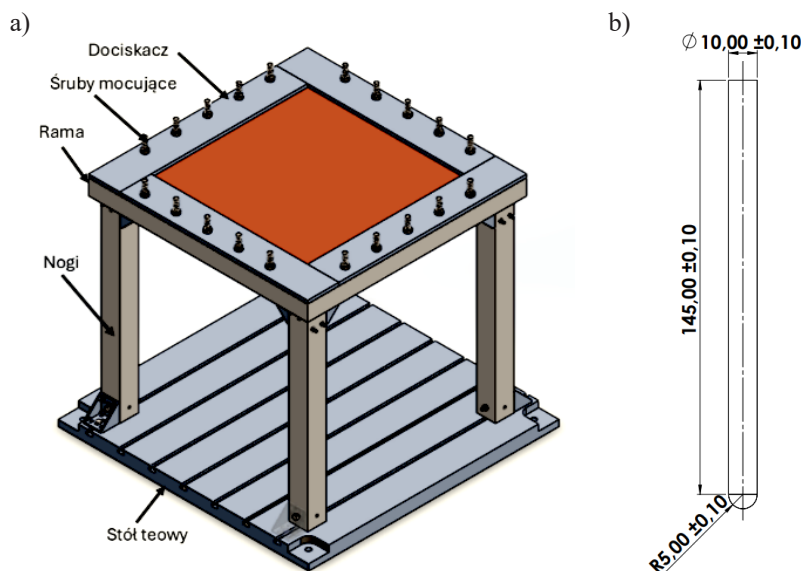
stanowisko z wykorzystaniem przemysłowego ramienia robotycznego Kawasaki RS030N. Wykonano zestaw narzędzi formujących oraz stworzono modułowe stanowisko do tłoczenia blach. Odpowiednio zmodyfikowano kod dla robota Dobot M1 Pro oraz wykonano wiele testów na blachach o grubości 1 mm ze stopów aluminium (1050 i 5754) i stali (S316L). Na rysunku 3 zaprezentowano schematycznie zakres prac wykonanych w projekcie.



Rys. 3. Schemat wykonanych prac w projekcie stanowiska do SPIF

2.2. WYKONANIE MODUŁOWEGO STANOWISKA DO TŁOCZENIA BLACH ORAZ TRZPIENIA FORMUJĄCEGO

Jednym z najważniejszych elementów projektu było wykonanie modułowego stanowiska do tłoczenia blach oraz trzpienia formującego. Biorąc pod uwagę charakterystykę planowanych procesów tłoczenia, zaprojektowano modułowe stanowisko umożliwiające tłoczenie blach o różnych wymiarach. Podstawowym polem roboczym, będącym maksymalnym rozmiarem wytłoczki, jest format 500 mm × 500 mm. Dodatkowo umożliwiono również modyfikację rozmiaru stołu do formowania blach do wielkości 200 mm × 200 mm. Aby zapewnić odpowiednią sztywność stołu, do konstrukcji użyto profili stalowych o grubości ścianki 6 mm (w przypadku nóżek profil 60 mm × 60 mm × 6 mm, w przypadku ramy 100 mm × 40 mm × 6 mm). Całość jest mocowana śrubami do aluminiowego stołu teowego, który jest przytwierdzony do podłoża czterema kotwami typu M14. Dodatkowo wytoczono trzpień tłoczący ze stali narzędziowej NC11LV o długości 145 mm i średnicy 10 mm. Narzędzie zakończone jest zaokrągleniem o promieniu 5 mm, które stanowi jego część roboczą. Trzpień został poddany obróbce cieplnej – kolejno hartowaniu (temperatura 1020°C) i odpuszczaniu (525°C/120 min), dzięki czemu uzyskano twardość na poziomie 60 HRC. Osiągnięta twardość zapewniła odpowiednie właściwości eksploatacyjne narzędzia na potrzeby procesu SPIF. Obróbka wykańczająca polegała na polerowaniu części roboczej w celu minimalizacji tarcia na styku narzędzie–blacha oraz w celu poprawy jakości powierzchni wytłoczki. Ogólny schemat stanowiska i trzpienia formującego przedstawiono na rysunku 4.



Rys. 4. Schemat przyrządowania stanowiska laboratoryjnego:
a) modułowe stanowisko do tłoczenia blach; b) trzpień formujący

2.3. OPROGRAMOWANIE STERUJĄCE PROCESEM FORMOWANIA SPIF

W ramach projektu opracowano aplikację w języku skryptowym Python z interfejsem graficznym Tkinter, umożliwiającą kompleksowe sterowanie robotem oraz zarządzanie procesem jednopunktowego formowania przyrostowego. Oprogramowanie integruje funkcje generowania i wizualizacji ścieżek formujących, co pozwala na wczesne wykrywanie potencjalnych błędów oraz precyzyjne dostosowanie parametrów sterowania jeszcze przed rozpoczęciem właściwego procesu technologicznego. Dzięki temu minimalizowane jest ryzyko nieprawidłowego działania, a użytkownik ma możliwość usprawnienia trajektorii ruchu narzędzia.

Aplikacja pozwala przede wszystkim na sterowanie robotem Dobot M1 Pro oraz ma specjalną sekcję przeznaczoną dla robota przemysłowego Kawasaki, umożliwiającą integrację z jego systemem sterowania. Wprowadzono obsługę generowania plików sterujących kompatybilnych z oprogramowaniem Kawasaki KIDE, co umożliwi płynne przeniesienie zaprojektowanych ścieżek do rzeczywistego procesu produkcyjnego. Takie podejście usprawnia wdrażanie nowych trajektorii oraz pozwala na precyzyjne odwzorowanie zaplanowanego ruchu narzędzia w środowisku rzeczywistym.

Interfejs użytkownika (rys. 5) został zaprojektowany z myślą o intuicyjnej obsłudze i elastyczności konfiguracji parametrów. Użytkownik może definiować trajektorie zarówno na podstawie gotowych wzorców, jak i tworzyć własne ścieżki dostosowane do specyficznych wymagań procesu. Dodatkowo wbudowane narzędzia do wizualizacji i symulacji ruchu umożliwiają analizę przebiegu operacji przed jej wykonaniem, co zwiększa kontrolę nad

procesem i poprawia jego efektywność. Aplikację wykorzystano do przeprowadzenia serii badań wstępnych procesu SPIF oraz testów formowania na stanowisku laboratoryjnym z użyciem ramienia robotycznego Kawasaki RS030N.

The screenshot displays a multi-panel graphical user interface for controlling the SPIF process. The panels include:

- Robot Connect:** Fields for IP Address (192.168.210.5), Dashboard Port (29999), Move Port (30003), and Feedback Port (30004), with a Disconnect button.
- Dashboard Function:** Buttons for Enable, Reset Robot, and Clear Error; a Speed Ratio set to 60%; and Digital Outputs (Index: 1, Status: On) with a Confirm button.
- Calibration:** Input fields for X, Y, Z, and R coordinates and rotation, along with buttons for MovJ, Initial Position, and Middle Position. It also features a grid of buttons for fine-tuning positions (e.g., X: -1.0, X: -5.0, etc.).
- SPIF:** Settings for Type (Triangle), Diameter (50 mm), Step (0.2 mm), and Depth (30 mm). It includes buttons for Execute Pattern, Show Plot, Make 4 Small Figures, and Generate Coordinates File.
- SPIF - From File:** Options for Move type (MovJ), Sync (No), and CP (0%). It includes buttons for Execute Path From File, Show Plot, and a STOP button.
- Feedback:** A section for robot mode (J1-J4) and position (X, Y, Z, R) with buttons for X-, X+, Y-, Y+, Z-, Z+, R-, R+. It also has a Current Position display and a Clear button.
- Log:** A vertical scrollable area for logging events.

Rys. 5. Interfejs graficzny aplikacji do sterowania procesem SPIF

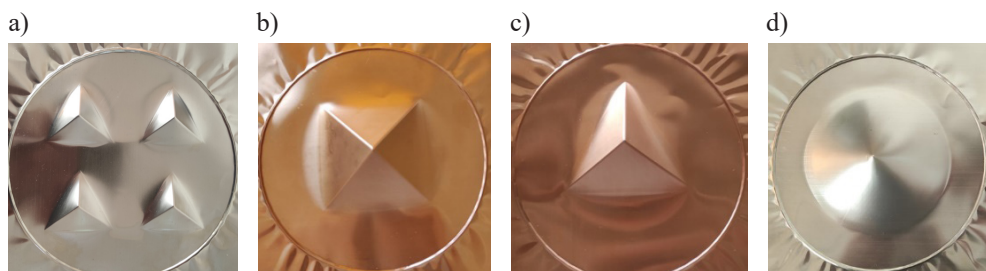
3. WYNIKI BADAŃ

Przedstawione wyniki badań związane są z procesem wykonywanym zarówno za pomocą ramienia robotycznego Dobot M1 Pro, jak i Kawasaki RS030N. Zwrócono szczególną uwagę na jakość wykonywanych wyrobów oraz poprawność i płynność ruchu narzędzia formującego.

Wykonanie testów procesu formowania SPIF

Celem testów wstępnych było sprawdzenie poprawności założeń związanych z projektowaniem trajektorii ruchu robota. Wykonano wiele formowań z zastosowaniem stanowiska

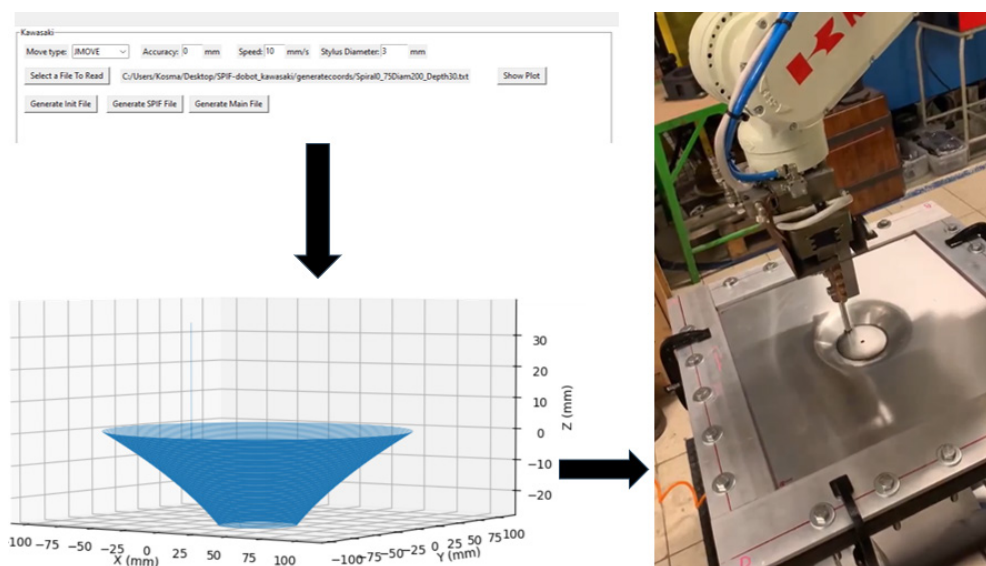
testowego z ramieniem Dobot M1 Pro, które polegały na wykonaniu wyrobów z miedzi i mosiądzu o skomplikowanym kształcie z jednoczesną kontrolą jakości wyrobu i identyfikacją błędów wynikających z nieprawidłowego ruchu robota. Wyniki testów formowania cienkich blach (0,1 mm) z miedzi (M1Ez4) i mosiądzu (M63z4) zaprezentowano na rysunku 6.



Rys. 6. Przykłady wyrobów testowych tłoczonych za pomocą robota Dobot M1 Pro:

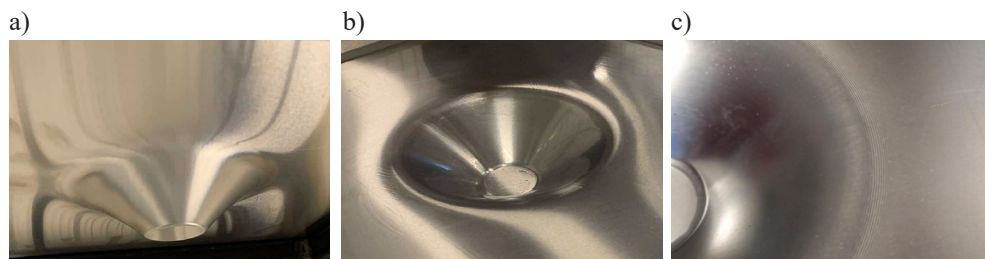
- a) tłoczenie wielokrotne z blachy mosiężnej; b) i c) wyroby o kształcie ostrosłupa z blachy miedzianej; d) wyrób o kształcie stożka z blachy mosiężnej

Po pomyślnym zweryfikowaniu działania oprogramowania do generowania ścieżek na stanowisku testowym z wykorzystaniem robota Dobot M1 Pro przeprowadzono eksperymenty z użyciem ramienia przemysłowego Kawasaki RS030N. Celem testów było zbadanie powtarzalności odwzorowania trajektorii po ich przeskalowaniu, czyli dopasowaniu do wymiarów roboczych stanowiska Kawasaki wraz z oceną możliwości zastosowania materiałów o zwiększonej grubości i twardości. Na rysunku 7 zaprezentowano przykładowy test.



Rys. 7. Schemat procesu SPIF uwzględniający wprowadzenie parametrów procesu, podgląd ścieżki i wykonanie wytłoczki

W ramach testu wykonano prototypową wytłoczkę z pełnowymiarowego arkusza blachy (500 mm × 500 mm) ze stopu aluminium 1050 o grubości 1 mm. Jak można zauważyć na rysunku 8, proces przebiegł prawidłowo i nie zaobserwowano wad wytłoczki w postaci pęknięć ani dużych odchyłeń od projektowanego kształtu. Na powierzchni wyrobu widoczne są niewielkie nierówności wynikające z ruchu i nacisku trzpienia na materiał. Bardziej szczegółowe wyznaczenie poziomu chropowatości powierzchni wymaga kolejnych badań, które są planowane na dalszych etapach projektu.



Rys. 8. Efekty tłoczenia prototypowej wytłoczki:
a) widok od spodu wytłoczki; b) widok z góry; c) podgląd na ściankę

4. PODSUMOWANIE I WNIOSKI

Zaprezentowane w artykule stanowisko zapewni rozwój obecnie modyfikowanego laboratorium służącego do plastycznego kształtowania materiałów z wykorzystaniem ramienia robotycznego znajdującego się w Katedrze Plastycznej Przeróbki Metali i Metalurgii Ekstrakcyjnej WIMiP AGH, a także jest wstępem do badań nad oddziaływaniem człowiek–robot w ramach koncepcji przemysłu 5.0 realizowanej w Katedrze Informatyki Stosowanej i Modelowania na tym samym wydziale. Opracowane rozwiązanie jest podstawą do projektowania nowoczesnych technologii przyrostowych oraz prowadzenia badań w tym zakresie. Wykorzystanie laboratorium do prowadzenia zajęć dydaktycznych przyczyni się do zwiększenia wiedzy technicznej oraz rozpowszechniania nowoczesnych technologii przeróbki plastycznej i zastosowań rozwiązań informatycznych w nowoczesnych przedsiębiorstwach.

Wykonane testy pokazują, że proces przebiega prawidłowo, a wytwarzane wyroby są pozbawione wad w postaci pęknięć. Dalsze prace nad stanowiskiem polegać będą na jego dostosowaniu do kształtowania materiałów trudnoodkształcalnych. W tym celu planuje się zaprojektowanie i wykonanie systemu nagrzewania wsadu oraz systemu pozwalającego na rejestrację i archiwizację parametrów procesu. Docelowo stanowisko ma służyć do badań nad tłocznością materiałów podatnych na pękanie, w przypadku których zastosowanie klasycznego procesu tłoczenia jest niemożliwe.

Podziękowania

Badania wykonane w ramach grantu IDUB pt. *Projekt ROBOSPIF – jednopunktowe kształtowanie blach z wykorzystaniem ramienia robotycznego i druku 3D* (wniosek 9027, działanie: D12, edycja: IV).

LITERATURA

- [1] Shang M., Li Y., Yang M., Yuan Q., Ding Y., Li L., *Investigation of formability and deformation behavior for forming concave-convex parts in single point incremental hydraulic forming*, Journal of Manufacturing Processes, vol. 134, 2025, s. 648–658, <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2024.12.053>.
- [2] Cheng Z., Li Y., Xu C., Liu Y., Ghafoor S., Li F., *Incremental sheet forming towards biomedical implants: a review*, Journal of Materials Research and Technology, vol. 9, iss. 4, 2020, s. 7225–7251, <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2020.04.096>.
- [3] Araújo R., Teixeira P., Montanari L., Reis A., Silva M., Martins P., *Single point incremental forming of a facial implant*, Prosthetics and Orthotics International, vol. 38(5), 2014, s. 369–378, <https://doi.org/10.1177/0309364613502071>.
- [4] Nasulea D., Oancea G., *Incremental deformation: A literature review*, MATEC Web of Conferences, 8th International Conference on Manufacturing Science and Education – MSE 2017 “Trends in New Industrial Revolution”, vol. 121, 2017, 03017, <https://doi.org/10.1051/mateconf/201712103017>.
- [5] Trzepieciński T., Oleksik V., Pepelnjak T., Najm S.M., Paniti I., Maji K., *Emerging trends in single point incremental sheet forming of lightweight metals*, Metals, vol. 11(8), 2021, 1188, <https://doi.org/10.3390/met11081188>.

Michał Korzeniowski*, Szczepan Kulik*

MODERN PROMOTION STRATEGIES IN SOCIAL MEDIA

Social media marketing strategically uses digital platforms to promote brands, engage audiences, and build consumer relationships. It provides opportunities for brand storytelling, user-generated content, and interactive engagement. Unlike traditional advertising, it enables to build connections with audiences, fostering mutual trust and loyalty. This paper focuses on effective organic promotion methods, particularly the strategic organic content (SOC) approach, which prioritizes authenticity and engagement over paid advertising. Through case studies of Bronx Boulderling, Duolingo, and Bandit Running, the paper illustrates how different brands successfully implement organic engagement strategies. These brands use educational content, humor, and subculture-driven branding to enhance interaction and build long-term relationships. Additionally, Bandit Running is highlighted as an example of lifestyle branding, emphasizing the role of social media communities in shaping modern marketing strategies. The analysis underscores the growing significance of organic marketing in the digital era, where authenticity and audience participation are key to brand success.

NOWOCZESNE STRATEGIE PROMOCJI W MEDIACH SPOŁECZNOŚCIOWYCH

Marketing w mediach społecznościowych to strategiczne wykorzystanie platform cyfrowych do promowania marek, angażowania odbiorców i budowania relacji z konsumentami. Pozwala on na opowiadanie historii marki, tworzenie treści przez użytkowników i interaktywne zaangażowanie. W przeciwieństwie do tradycyjnej reklamy umożliwia budowanie więzi z odbiorcami oraz wzmacnianie wzajemnego zaufania i lojalności. Artykuł omawia skuteczne metody promocji organicznej, szczególnie podejście do strategicznych treści organicznych (SOC – *strategic organic content*), które polega na przedkładaniu autentyczności i zaangażowania nad płatną reklamę. Dzięki zastosowaniu metody studium przypadku pokazano, jak wybrane firmy (Bronx Boulderling, Duolingo i Bandit Running) skutecznie wdrażają strategie organicznego zaangażowania, wykorzystując treści edukacyjne, humor oraz branding oparty na subkulturze, by wchodzić w interakcję z odbiorcami i budować długofalowe relacje. Dodatkowo przedstawiono Bandit Running jako przykład budowania marki wokół stylu życia, podkreślając wpływ społeczności tworzących się w social mediach na współczesne strategie marketingowe. Opierając się na przeglądzie literatury i wiedzy branżowej, starano się także pokazać rosnące znaczenie marketingu organicznego w erze cyfrowej, w której autentyczność i udział odbiorców kształtują sukces marki.

* AGH University of Krakow, Faculty of Civil Engineering and Resource Management.

1. INTRODUCTION

Social media has transformed the way brands interact with their audiences, evolving from a secondary marketing channel into an essential component of digital brand strategy. With billions of users engaging daily across platforms such as Facebook, Instagram, TikTok, and LinkedIn, businesses must recognize the importance of an active and strategic presence. However, the highly competitive and algorithm-driven nature of these platforms requires more than just conventional advertising methods; it necessitates a deep understanding of audience behavior, content virality, and engagement trends.

An effective social media strategy does not solely rely on paid advertisements but also on building organic connections with users. Organic content fosters relationships between brands and consumers by emphasizing authenticity, storytelling, and user participation. Studies indicate that consumers are more likely to engage with brands that provide value beyond direct sales pitches. This has led to the rise of the strategic organic content (SOC) approach, which prioritizes community-driven interactions and long-term engagement over short-term promotional tactics.

One of the major challenges in social media marketing is platform algorithm variability. Social media networks frequently update their algorithms to prioritize content that generates meaningful interactions, making it essential for brands to adapt continuously. Unlike traditional media, where exposure is often guaranteed through paid placements, social media requires an intricate balance of engaging content, influencer collaborations, and user-generated content (UGC) to maximize visibility. In fact, research suggests that 86% of companies integrate UGC into their social media strategies, leading to an average 29% increase in conversion rates compared to brands that do not leverage user-created content [1].

One of the key drivers of consumer engagement is content relevance. Personalized content, tailored to individual interests and behaviors, significantly increases audience retention and interaction rates. Advances in artificial intelligence and data analytics enable brands to deliver targeted content, ensuring that users see messages that resonate with their preferences. Additionally, social listening tools help brands analyze trends and audience sentiment, allowing for more effective engagement strategies.

Another critical factor in social media success is community building. Rather than focusing solely on increasing follower counts, brands that invest in nurturing active, loyal communities tend to achieve higher engagement and conversion rates. This approach aligns with the principles of relationship marketing, which emphasizes long-term consumer relationships over transactional interactions. Research suggests that digital engagement strategies such as e-marketing and electronic customer relationship management (e-CRM) can enhance brand trust and foster loyalty among online consumers [2]. However, while e-marketing and e-CRM contribute significantly to brand awareness and customer relationships, their direct impact on e-loyalty may be limited. This highlights the need for brands to supplement digital marketing efforts with organic engagement strategies, interactive content, and personalized experiences.

As competition on social media platforms intensifies, the ability to foster trust and credibility becomes a key differentiator. Consumers are increasingly wary of overtly promotional

content, preferring brands that prioritize transparency and authenticity. User-generated content (UGC), employee advocacy, and behind-the-scenes storytelling are among the most effective tactics for reinforcing brand credibility. By leveraging these strategies, businesses can cultivate deeper emotional connections with their audiences, ultimately translating into higher customer retention and long-term brand loyalty.

2. CHARACTERISTICS OF ORGANIC CONTENT

The distinction between organic and paid content is critical in understanding modern marketing dynamics. While paid promotions provide immediate reach, organic strategies rely on sustained audience engagement and content virality. The effectiveness of organic content is rooted in trust and authenticity, which contribute to long-term brand loyalty. Organic content refers to social media posts that gain traction without paid promotions, relying on quality, informational value, and shareability. Categories are presented in Figure 1.

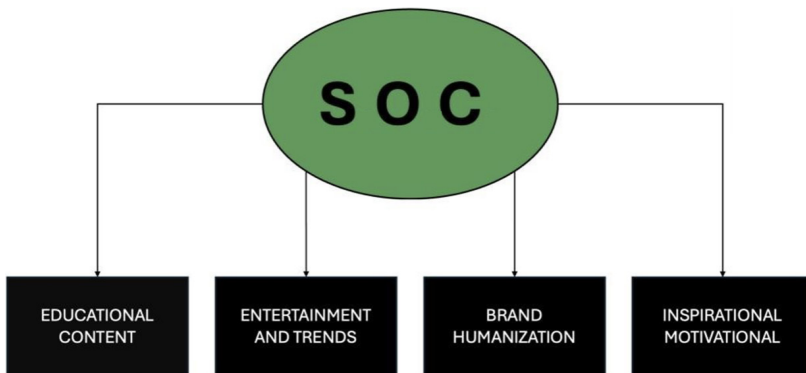


Fig. 1. Types of strategic organic content (SOC)

Educational Content is providing valuable information to users, with studies indicating that the use of appropriate marketing metrics in social media can significantly increase audience engagement [3]. Entertainment and Trends is a category of content that focuses on leveraging trending topics for engagement. Brand Humanization content bases on presenting the brand in a relatable and authentic manner, which can lead to increased customer trust and loyalty [2]. Inspirational and Motivational Content is strengthening emotional connections with audiences.

3. CASE STUDIES

3.1. METHODOLOGY

This study employs a qualitative case study approach to examine how different brands implement organic content strategies in social media marketing. The use of a qualitative methodology allows for an in-depth exploration of how brands interact with their audiences, cultivate

engagement, and establish trust through non-paid, community-driven content. By analyzing real-world cases, this research seeks to uncover patterns in successful organic marketing and provide insights that can be applied to broader digital marketing strategies.

To conduct this study, data was gathered from a range of publicly available sources, including company reports, social media activity, industry analyses, and academic literature. The selection of case studies was based on specific criteria, ensuring that each brand examined had demonstrated successful engagement strategies on social media without significant reliance on paid promotions. The focus of the research was to identify the underlying factors that contribute to organic content success, such as authenticity, storytelling, audience participation, and algorithmic adaptability.

3.2. BRONX BOULDERING: EDUCATIONAL STRATEGY

Bronx Boulderling, a climbing-focused brand, effectively utilizes short-form mobile videos to engage audiences, positively influencing consumer purchase intentions [4]. Based on their Instagram statistics, their reach is significantly bigger than other comparable profiles. Their approach includes utilizing platform algorithms that promote short-form videos, providing valuable educational content, as well as creating entertaining and dynamic formats.

Brand outcomes

By sharing climbing tips and highlighting local events, Bronx Boulderling fosters a sense of community among enthusiasts, potentially leading to increased customer retention and word-of-mouth referrals. Consistently providing valuable content may establish the brand as a trusted resource in the climbing community, enhancing its reputation and attracting new customers.

3.3. DUOLINGO – HUMOR AND AUTHENTICITY

Duolingo integrates humorous, trend-driven content, resulting in significant social media engagement. Research indicates that humor in video content can enhance audience engagement [5]. Key elements include creating shareable content, emphasizing authenticity and humor, and breaking conventional marketing norms.

Brand outcomes

By embracing a playful and unorthodox content strategy, Duolingo's TikTok account amassed over 8.2 million followers within two years, positioning its mascot, Duo the Owl, as a social media sensation. The brand's humorous and trend-aligned content has not only entertained existing users but also attracted new audiences, thereby broadening its market reach. Duolingo's content often garners millions of likes and shares, fostering a robust online community and reinforcing user loyalty.

3.4. BANDIT RUNNING – VIBE CURATION AND COMMUNITY BUILDING

Bandit Running, a running apparel brand, successfully employs a vibe curation strategy – an approach that carefully curates an aesthetic, emotional, and community driven atmosphere around the product. This strategy integrates lifestyle branding principles, emphasizing shared values and experiences to create a deeper consumer-brand connection. Their marketing efforts involve hosting informal running events, designing minimalist apparel aligned with independent lifestyles, building a community around values of authenticity and freedom, and collaborating with influencers who align with the ‘bandit running’ movement.

Bandit running as a subculture

The term ‘bandit running’ originates from the practice of runners participating in races without official registration. Over time, it has evolved into a broader movement emphasizing freedom, authenticity, and a rejection of rigid commercialized sports culture. Brands like Bandit Running leverage this identity, aligning their marketing with the values of rebelliousness, independence, and community-driven experiences. By tapping into this subculture, Bandit Running strengthens its brand image and positions itself as an advocate for grassroots, passion-driven sports culture.

Brand outcomes

The emphasis on authenticity and independent values cultivates a dedicated customer base that strongly identifies with the brand ethos. Simultaneously, the organic content strategy, infused with real-life user experiences and minimalistic aesthetics, resonates with digital audiences, driving higher interaction rates and increasing social media engagement. Additionally, the brand’s informal running events serve as both marketing tools and engagement hubs, further embedding Bandit Running into the fabric of the running subculture and strengthening its cultural alignment with running communities.

Vibe curation beyond bandit running: the case of Charli XCX and the *Brat* aesthetic

Vibe curation is the strategic creation of a distinct aesthetic and cultural identity that extends beyond a product to form an immersive experience. Charli XCX’s *Brat* era exemplifies this through cohesive visual branding, deep fan engagement, and alignment with underground music and fashion subcultures.

‘Brat’ is both the title of Charli XCX’s 2024 album and a broader aesthetic movement that embodies elements of rebellion, hyperpop minimalism, and digital-era club culture. The term ‘brat’ conveys a playful yet defiant attitude, aligning with themes of self-expression, non-conformity, and internet-driven cultural remixing. The era is defined by stark visual minimalism, most notably a striking neon-green branding, glitchy electronic soundscapes, and references to early-2000s underground club aesthetics. *Brat* does not just represent an album release; it is a fully formed artistic statement that extends into fashion, digital engagement, and fan-driven cultural participation.

The *Brat* era exemplifies modern engagement strategies within the music industry. According to the International Federation of the Phonographic Industry *Global Music Report* [6], digital-first promotional strategies, particularly those emphasizing audience interactivity, are increasingly shaping album success. The report highlights how artists who integrate visual branding, meme culture, and participatory digital tools see higher engagement rates across streaming platforms. *Brat's* aesthetic coherence and community-driven identity align with these trends, helping it resonate beyond Charli XCX's existing fanbase.

The success of this approach is reflected in *Brat's* commercial and cultural impact. The album debuted at number three on the Billboard 200, marking Charli XCX's highest-charting release to date. In its first week, it amassed 46.72 million on-demand streams across its 18 tracks, demonstrating the effectiveness of the album's visual and digital branding in driving audience engagement [6]. The album also fueled significant social media engagement through fan-driven digital tools, reinforcing its presence online and contributing to its cultural significance.

Collaborations with underground producers and visual artists enhance credibility, mirroring Bandit Running's partnerships with independent athletes. *Brat's* success lies in its ability to merge music, visual culture, and participatory digital engagement, crafting a fully immersive identity that extends beyond traditional marketing strategies.

4. CONCLUSIONS

The analysis of Bronx Boulderling illustrates the power of educational content in fostering engagement and brand authority, while Duolingo's case emphasizes the effectiveness of humor and authenticity in expanding audience reach. Additionally, Bandit Running demonstrates the impact of community-building and subcultural branding. Collectively, these findings highlight that successful social media marketing depends on audience specific content and interactive formats. Research indicates that consumers value authenticity in video content more than high production quality, suggesting that authentic content enhances audience engagement [7]. Additionally, the vibe curation trend aligns with the growing personalization of social media marketing, strengthening communities around brands. Bandit Running exemplifies how tapping into subcultural movements can amplify marketing impact, as authenticity-driven communities create long-term brand advocates. Similarly, Charli XCX's *Brat* era exemplifies how strategic branding, aesthetic coherence, and participatory digital engagement can elevate an artist or brand's cultural relevance. By crafting a distinct visual identity and fostering a deeply engaged online community, the *Brat* movement leveraged social media virality and subcultural alignment to drive both fan loyalty and commercial success. This case further supports the notion that immersive branding and interactive audience participation are crucial factors in modern digital marketing.

REFERENCES

- [1] Jain A., Mallick D., *100+ social media marketing statistics every marketer must know*, 2024, <https://www.sprinklr.com/blog/social-media-marketing-statistics/> [access: 23.06.2025].

- [2] Haudi, Rahadjeng E., Santamoko R., Putra R.S., Purwoko D., Nurjannah D., Koho I.R., Wijoyo H., Siagian A.O., Cahyono Y., Purwanto A., *The role of e-marketing and e-CRM on e-loyalty of Indonesian companies during Covid pandemic and digital era*, *Uncertain Supply Chain Management*, vol. 10, iss. 1, 2022, pp. 217–224. <http://doi.org/10.5267/j.uscm.2021.9.006>.
- [3] Kočišová L., Štarchoň P., *The role of marketing metrics in social media: A comprehensive analysis*, *Marketing Science & Inspirations*, vol. 18, iss. 2, 2023, pp. 40–49. <https://doi.org/10.46286/msi.2023.18.2.4>.
- [4] He C., Yang J., *The influence of mobile short video content marketing on consumers' purchase intention: A test of two-mediation model*, *Academic Journal of Business & Management*, vol. 5, iss. 19, 2023, pp. 107–115. <https://doi.org/10.25236/AJBM.2023.051916>.
- [5] Barry J.M., Graça S.S., *Humor effectiveness in social video engagement*, *Journal of Marketing Theory and Practice*, vol. 26, iss. 1–2, 2018, pp. 158–180. <https://doi.org/10.1080/10696679.2017.1389247>.
- [6] International Federation of the Phonographic Industry (IFPI), *Global Music Report 2024. State of The Industry*, https://www.ifpi.org/wp-content/uploads/2024/04/GMR_2024_State_of_the_Industry.pdf.
- [7] Lanier S., *How to build brand authenticity that wins over customers*, 2023, <https://blog.hubspot.com/marketing/brand-authenticity> [access: 23.06.2025].

Justyna Kowalik*

MODELOWANIE PROCESU PNEUMATYCZNEGO FORMOWANIA CIENKICH POWŁOK STALOWYCH TECHNOLOGIĄ FIDU

Celem pracy było zbadanie zachowania się cienkiej powłoki formowanej w technologii FiDU (*Freie Innendruck Umformung*), polegającej na wycięciu z blachy dwóch identycznych kształtów, których krawędzie są następnie spawane. W kolejnym kroku formuje się je, działając odpowiednim ciśnieniem wewnętrznym. Proces formowania cienkich powłok stalowych został zamodelowany przy wykorzystaniu metody elementów skończonych za pomocą programu MARC oraz nieliniowej analizy numerycznej. W tym celu określono geometrię elementu poprzez wykreślenie jej wycinka powtarzalnego wokół środka geometrycznego. Materiał dobrano, wprowadzając do programu odpowiednie charakterystyki materiałowe. Nadano również odpowiednie warunki brzegowe i przyjęto przypadek obciążenia, w którym zdefiniowano wartość ciśnienia wewnętrznego oddziałującego na powłokę. Wynikami są mapy przemieszczeń, naprężeń oraz grubości blachy. Można również zaobserwować sposób deformacji powłoki.

MODELLING THE PROCESS OF PNEUMATIC MOULDING OF THIN STEEL SHEET USING FIDU TECHNOLOGY

The aim of the study is to investigate the behaviour of a thin shell formed using the FiDU technology, which is based on cutting two identical shapes from steel sheet, which the edges are welded. Then, they are moulded by acting with appropriate internal pressure. The process of forming thin steel shells was modeled in MARC program using the finite element method and the nonlinear numerical analysis. For this purpose, the geometry of the element was determined by modeling its section repeatable around the geometric center. The material was determined by entering appropriate material characteristics into the program. Appropriate boundary conditions were also assigned and a corresponding load case was created, in which the value of the internal pressure acting on the shell was defined. The results are maps of displacements, stresses and sheet thickness. The way the shell deformed can also be observed.

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

1. WSTĘP

Technologia FiDU została opracowana przez polskiego architekta Oskara Ziębę. Polega ona na wycięciu z cienkiej blachy dwóch identycznych kształtów, których krawędzie są spawane. Następnie formuje się je, działając odpowiednim ciśnieniem wewnętrznym. Proces ten przypomina pompowanie dętki. W ten sposób uzyskuje się z płaskich kształtów elementy trójwymiarowe charakteryzujące się lekkością, trwałością oraz funkcjonalnością [1]. Oprócz najczęściej wykonywanych elementów użytkowych (meble, wyposażenie wnętrz) technologia ta używana jest w budownictwie, np. jako obiekty małej architektury [2, 3]. Przykładowe realizacje wykonane w technologii FiDU przedstawiono na rysunkach 1 oraz 2.



Rys. 1. Krzesło PLOPP wykonane w technologii FiDU

Źródło: [4]



Rys. 2. Rzeźba NAWA we Wrocławiu wykonany w technologii FiDU

Źródło: [5]

Tworzenie elementów w technologii FiDU ze względu na dużą odkształcalność materiału pod wpływem wewnętrznego ciśnienia jest zagadnieniem skomplikowanym i dlatego trudnym do zamodelowania. Należy mieć na uwadze właściwości oraz sposób zachowania się analizowanego materiału.

Przy modelowaniu procesu „pompowania” blach w technologii FiDU należy mieć na uwadze duże odkształcenia i przemieszczenia cienkich powłok, powodujące konieczność uwzględnienia efektów lokalnych (zmarszczenia blach oraz możliwe uplastycznienia materiału). Dodatkowo należy również przewidzieć możliwość wystąpienia samokontaktu, czyli zjawiska kontaktowania się blach w zmarszczeniach. To wszystko sprawia, że należy wykorzystać techniki adaptacji siatki MES oraz nieliniowe algorytmy wyznaczania stanu równowagi w każdym kroku obliczeniowym [6].

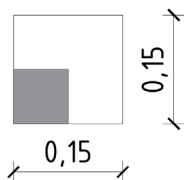
2. ANALIZOWANE MODELE

2.1. GEOMETRIA MODELI

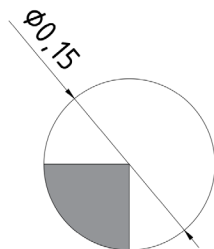
W niniejszej pracy proces formowania cienkich powłok stalowych został zamodelowany przy wykorzystaniu metody elementów skończonych [7, 8] za pomocą programu MARC [6]. Rozważono trzy modele o geometriach o kształcie:

- 1) kwadratu o boku 0,15 m,
- 2) koła o średnicy 0,15 m,
- 3) pierścienia o średnicach: wewnętrznej 0,4 m oraz zewnętrznej 0,7 m.

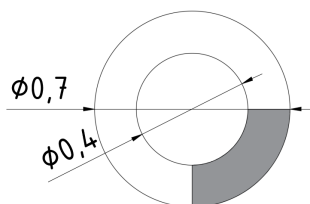
Zostały one przedstawione na rysunkach 3–5. Z uwagi na fakt, że wszystkie figury charakteryzują się co najmniej podwójną symetrią, dla uproszczenia i przyspieszenia obliczeń analizowano zaznaczone na rysunkach obszary – ćwiartki.



Rys. 3. Model fizyczny o geometrii typu 1

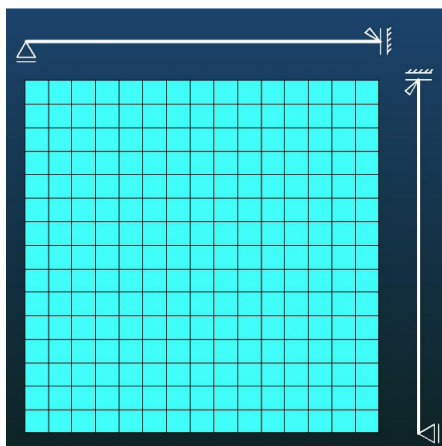


Rys. 4. Model fizyczny o geometrii typu 2

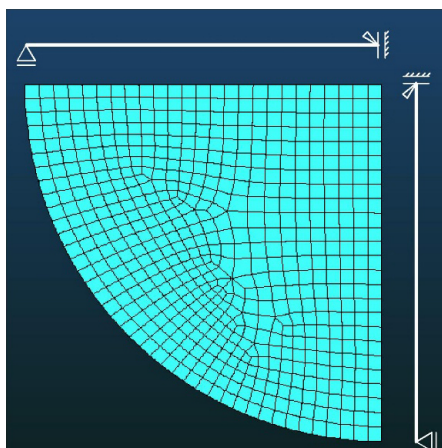


Rys. 5. Model fizyczny o geometrii typu 3

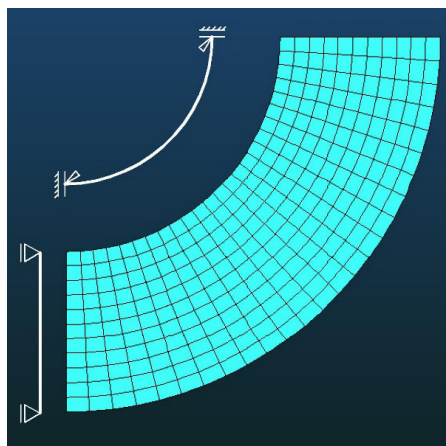
Na rysunkach 6–8 przedstawiono wstępną siatkę modelu MES analizowanych fragm-
tów powłok.



Rys. 6. Dyskretyzacja modelu oraz warunki brzegowe dla geometrii typu 1



Rys. 7. Dyskretyzacja modelu oraz warunki brzegowe dla geometrii typu 2



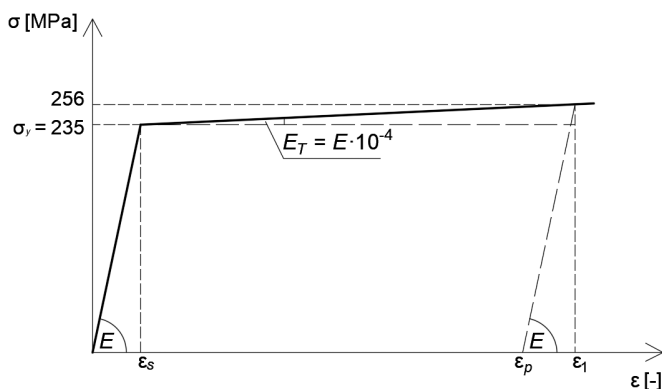
Rys. 8. Dyskretyzacja modelu oraz warunki brzegowe dla geometrii typu 3

2.2. MATERIAŁ

Założono, że blachy będą wykonane ze stali konstrukcyjnej S235 o następujących parametrach normowych [9]:

- gęstość 7850 kg/m^3 ,
- moduł Younga 210 GPa ,
- współczynnik Poissona $0,3$,
- granica plastyczności 235 MPa ,
- oraz grubość $0,4 \text{ mm}$.

W procesach „pompowania” lokalnie mogą pojawić się uplastycznienia materiału. W niniejszej analizie przyjęto model sprężysto-plastyczny z liniowym wzmocnieniem. Na rysunku 9 przedstawiono wykres zależności naprężenia od odkształcenia modelowanego materiału [10].



Rys. 9. Wykres naprężenie-odkształcenie materiału

Źródło: opracowanie na podstawie [10]

2.3. WARUNKI BRZEGOWE

Kinematyczne warunki brzegowe, przedstawione na rysunkach 6–8, zdefiniowano w taki sposób, aby odwzorowywały zachowanie się blachy podczas procesu „pompowania”. Na krawędziach zewnętrznych zablokowano możliwość ruchu w płaszczyźnie prostopadłej do powierzchni nieodkształconej blachy, a na krawędziach wewnętrznych zablokowano możliwość ruchu prostopadłego do krawędzi, rotacji względem tej krawędzi oraz względem osi prostopadłej do powierzchni nieodkształconej blachy. Dodatkowo, jeżeli środek geometryczny modelu fizycznego znajdował się w obszarze modelu numerycznego, to dla tego punktu również zdefiniowano kinematyczne warunki brzegowe. Zablokowano tu wszystkie możliwości ruchu i rotacji oprócz ruchu wzdłuż osi normalnej do powierzchni nieodkształconej blachy.

Kolejnym krokiem była definicja statycznych warunków brzegowych, czyli obciążenia działającego na powierzchnię blachy. Obciążenie to zdefiniowano jako obciążenie jednorodne, powierzchniowe, o odpowiedniej wartości dla każdego typu geometrii. W celu jak najlepszego odwzorowania procesu obciążenia przykładane obciążenie rośnie liniowo od wartości 0 do zdefiniowanej wartości końcowej wynoszącej dla każdego typu geometrii odpowiednio 70 kPa, 38 kPa oraz 7 kPa [11, 12].

Podczas „pompowania” blacha odkształca się, jednak obciążenie to jest zawsze normalne do powierzchni w aktualnej konfiguracji, dlatego takie obciążenia nazywają się śledzącymi (*following forces*). Analiza tego typu sił powoduje dodatkowo niesymetrię macierzy sztywności. W ten sposób w każdym kolejnym kroku obliczeniowym obciążenie zmienia swój kierunek na kierunek normalny do odkształconej powierzchni blach [6, 12].

3. PRZEPROWADZENIE OBLICZEŃ W PROGRAMIE MARC

Przeprowadzenie obliczeń z zastosowaniem MES zamodelowanego problemu „pompowania” ciśnieniem blach jest skomplikowane. Blacha może się dowolnie odkształcać, ponieważ jedynym ograniczeniem jest spawane połączenie obu blach oraz sam materiał. Z tego powodu w analizie należało uwzględnić nieliniowość materiałową oraz geometryczną.

Nieliniowość materiałowa wynika ze sposobu modelowania materiału, w którym uwzględniono plastyczność oraz możliwą nieliniowość geometryczną.

Nieliniowość geometryczna wynika z zastosowania obciążenia śledzącego, powodującego duże odkształcenia [6, 11, 13].

Metoda rozwiązania zadania

W celu przeprowadzenia obliczeń w programie MARC uaktywniono analizę dużych przemieszczeń i odkształceń (analiza geometrycznie nieliniowa) oraz założono możliwość pojawienia się nieliniowości fizycznej (z uwagi na możliwość uplastycznienia materiału wraz z opcją *following forces*). W rozwiązaniu zastosowano kryteria zbieżności Newtona–Raphsona

z automatycznym sterowaniem przyrostu obciążenia. Dodatkowo z uwagi na możliwość wystąpienia lokalnych zjawisk marszczenia powłoki zastosowano adaptację siatki typu h^1 . Polega ona na zagęszczaniu siatki w miejscach, gdzie kryterium adaptacyjne jest spełnione. W pracy przyjęto następujące parametry rozwiązania zadania:

- parametr adaptacyjny:

$$\frac{\sigma_{red_i}}{\max(\sigma_{red_i})} > \sigma_{red_dop} = 0,5 \quad (1)$$

- kryterium zbieżność dla sił rezydualnych:

$$\frac{R_{i+1}}{R_i} \leq R_{dop} = 0,1 \quad (2)$$

- kryterium zbieżność w przemieszczeniach:

$$\frac{u_{i+1}}{u_i} \leq u_{dop} = 0,1 \quad (3)$$

Adaptacja siatki polega na zagęszczeniu siatki MES tam, gdzie zostanie wykryta koncentracja naprężeń, czyli wtedy, gdy naprężenia w danym węźle przekroczą wartość graniczną zgodnie z równaniem (1). Adaptacja izotropowa polega na zastąpieniu danego elementu siatki nowymi elementami o mniejszym rozmiarze [6].

4. ANALIZA WYNIKÓW

Analizie zostały poddane przemieszczenia prostopadłe do nieodkształconej powierzchni blachy, naprężenia zredukowane według hipotezy H-M-H (hipotezy Hubera–Misesa–Hencky’ego) oraz grubość blachy, które zostaną omówione dla każdego typu geometrii osobno.

4.1. ANALIZA WYNIKÓW GEOMETRII TYPU 1

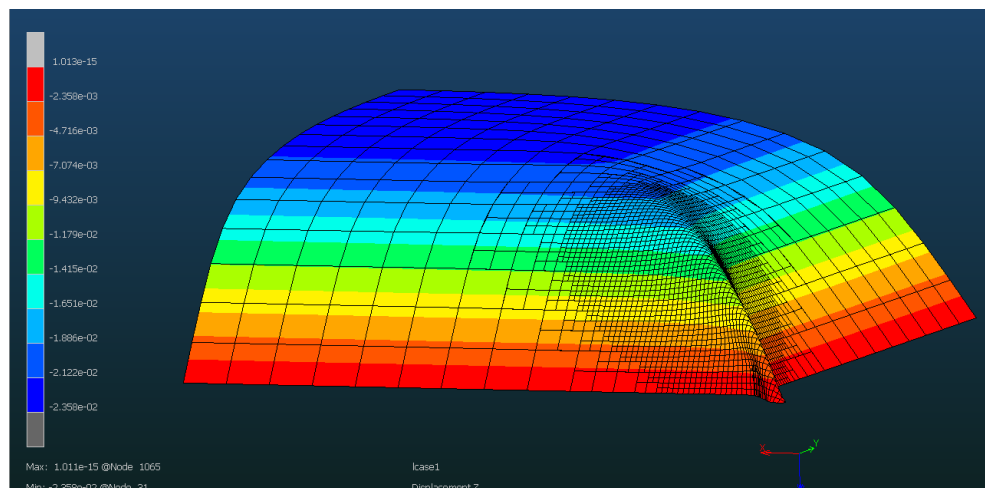
Dla geometrii typu 1 w obrazie deformacji powstało zmarszczenie przy narożniku, który był wyciągany do momentu, gdy dochodziło do kontaktu w zagięciu blachy, wtedy analiza była przerywana. Wyniki zostały przedstawione na rysunkach 10–12.

Maksymalne przemieszczenia obserwowane były w środku geometrycznym i wynosiły 2,36 cm. W tym przypadku nie były obserwowane uplastycznienia. Przy dalszym

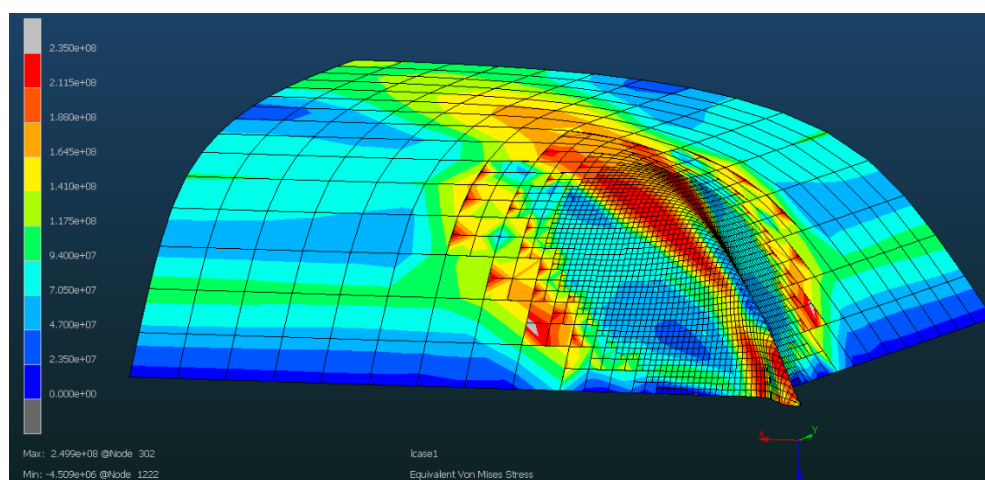
¹ W tym przypadku nie będzie dochodzić do zmian ciśnienia w trakcie pompowania wywołanego zmianą konfiguracji blach – przeskoków (*snap-through*).

„pompowaniu” doszłoby do uplastycznienia materiału w strefie narożnikowej w wyniku kontaktu blachy w zmarszczeniu. Lokalne zmiany grubości również zauważono w tej strefie. Zaobserwowano pole ciągnięć w zmarszczeniu naroża, powodujące, że blacha była lokalnie cieńsza i jej grubość wynosiła 0,373 mm.

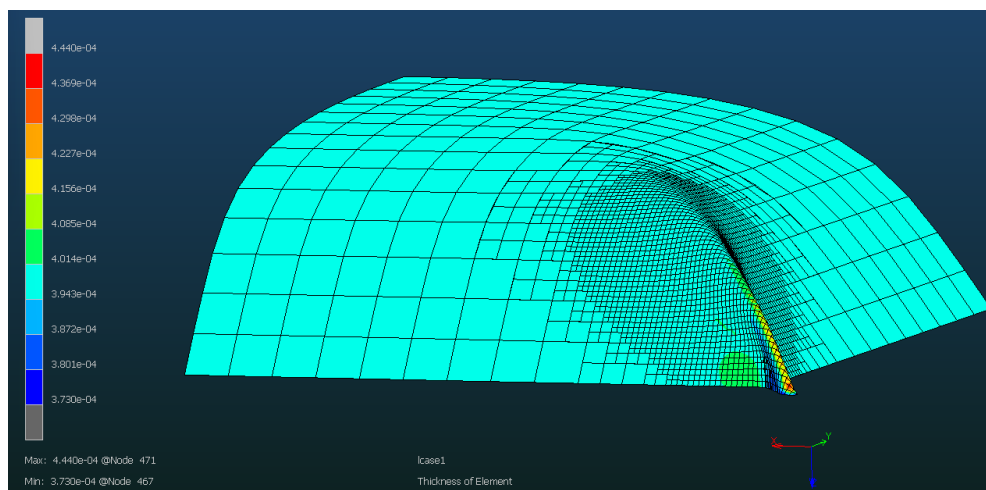
Na rysunku 13 przedstawiono deformację dla geometrii typu 1.



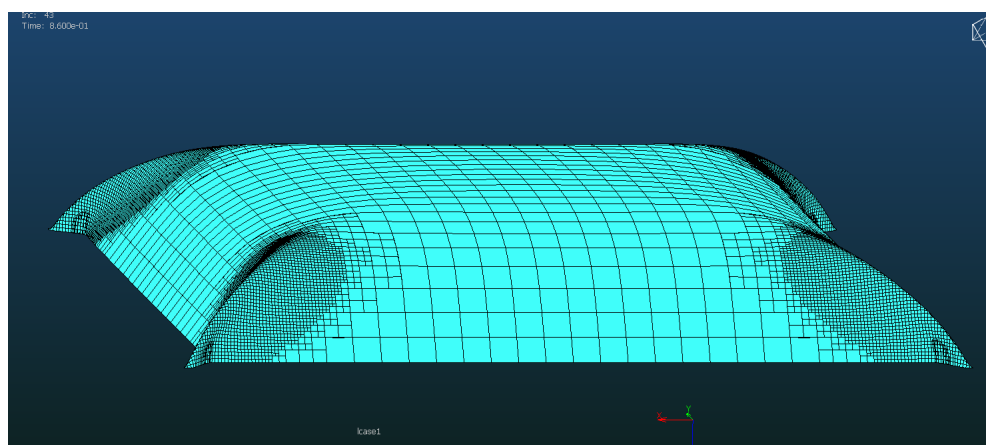
Rys. 10. Przeszyczenia w kierunku prostopadłym do powierzchni nieodkształconej blachy dla geometrii typu 1



Rys. 11. Naprężenia zredukowane według hipotezy H-M-H dla geometrii typu 1



Rys. 12. Grubość blachy dla geometrii typu 1

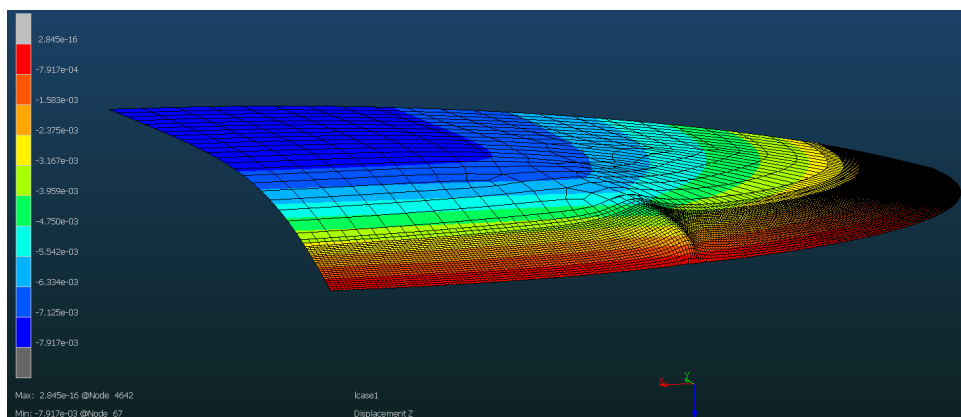


Rys. 13. Deformacja geometrii typu 1

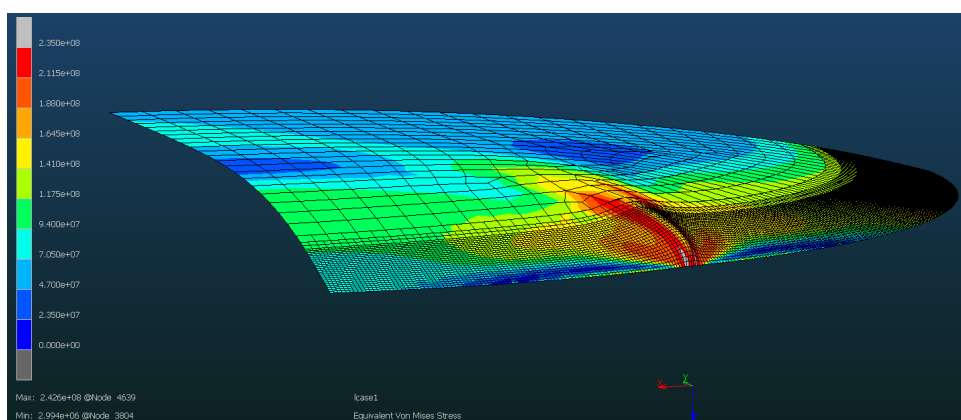
4.2. ANALIZA WYNIKÓW GEOMETRII TYPU 2

W przypadku geometrii typu 2 w obrazie deformacji powstało zmarszczenie, które spowodowało nierównomierność wyników na powierzchni modelu. Zmarszczenia te są konsekwencją niejednorodności siatki. Otrzymane wyniki zostały przedstawione na rysunkach 14–16.

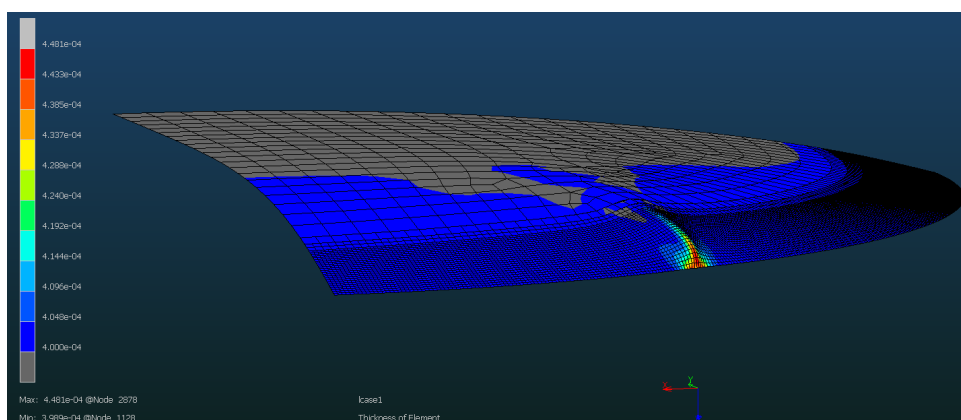
Ten przykład pokazuje, że analizy procesów silnie nieliniowych są niezwykle wrażliwe na zaburzenia siatki. W analizowanym procesie „pompowania” blach wykonanych z jednorodnego materiału zmarszczenia powinny być obserwowane w miarę regularnie na obwodzie.



Rys. 14. Przeszczenia w kierunku prostopadłym do powierzchni nieodkształconej blachy dla geometrii typu 2



Rys. 15. Naprężenia zredukowane według hipotezy H-M-H dla geometrii typu 2

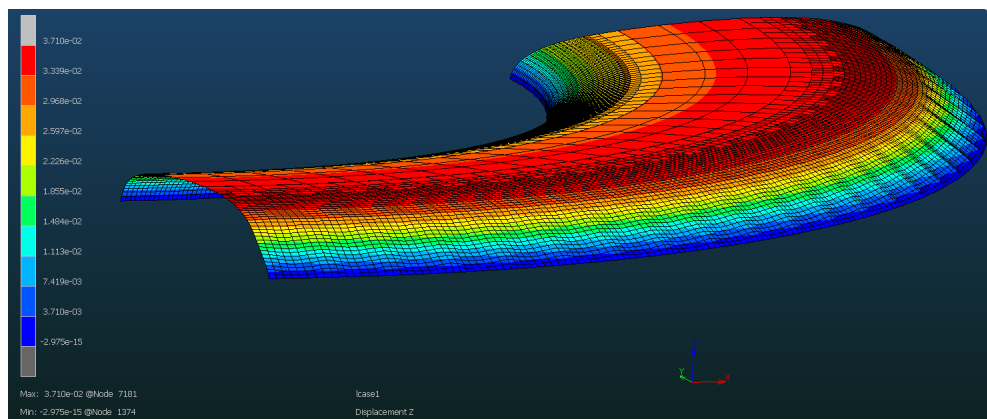


Rys. 16. Grubość blachy dla geometrii typu 2

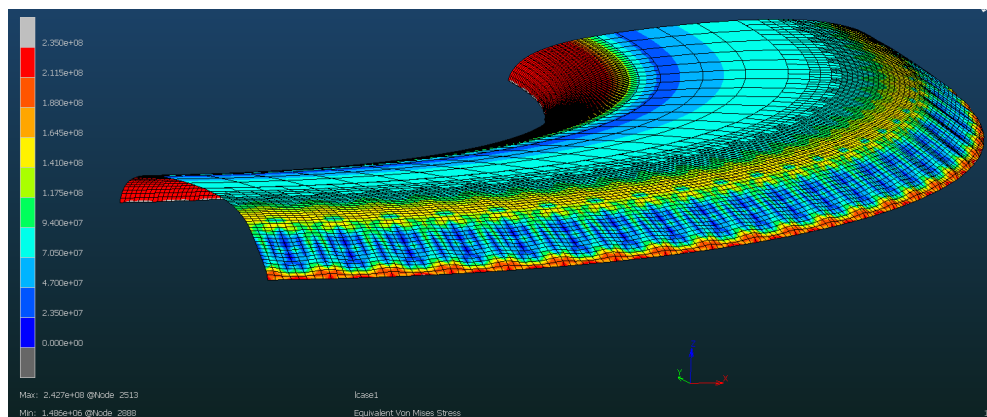
4.3. ANALIZA WYNIKÓW GEOMETRII TYPU 3

Zmarszczenia były obserwowane również w przypadku geometrii typu 3 – pojawiały się wzdłuż zewnętrznego obwodu i były liczniejsze niż w przypadku geometrii typu 1.

Wyniki dla geometrii typu 3 przedstawiają rysunki 17–19.

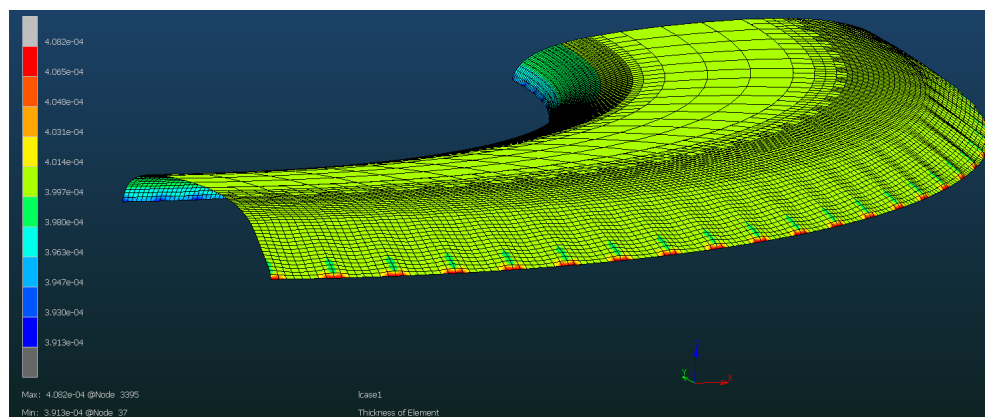


Rys. 17. Przeszczenia w kierunku prostopadłym do powierzchni nieodkształconej blachy dla geometrii typu 3



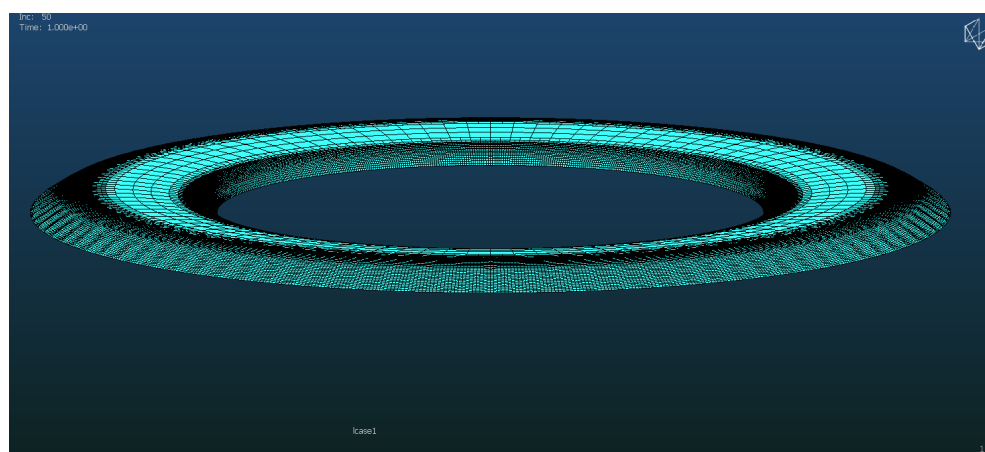
Rys. 18. Naprężenia zredukowane według hipotezy H-M-H dla geometrii typu 3

Maksymalne przemieszczenia, których wartość wynosiła 3,71 cm, obserwowane były w wewnętrznej części modelu. Uplastycznienia osiągały na krawędzi zewnętrznej w miejscach wybrzuszeń oraz wklęśnięć blachy. Wraz z oddalaniem się od krawędzi zewnętrznej na zmarszczeniach blacha stawała się cieńsza tak samo jak na całej krawędzi wewnętrznej, a minimalna jej grubość wyniosła 0,391 mm.



Rys. 19. Grubość blachy dla geometrii typu 3

Rysunek 20 przedstawia obraz deformacji całej geometrii.



Rys. 20. Deformacja geometrii typu 3

5. PODSUMOWANIE

Modelowanie procesu pneumatycznego pompowania cienkich blach stalowych jest zagadnieniem złożonym i trudnym. Przy tworzeniu modelu należy zwrócić uwagę na problem nieliniowości geometrycznej oraz materiałowej, a także na samo przeprowadzenie obliczeń z wykorzystaniem odpowiedniej metody numerycznej.

W przypadku geometrii typu 1 analizę przerwano ze względu na ryzyko dojścia do samo-kontaktu. Model stworzony dla geometrii typu 2 pokazuje, jak czułe są obliczenia na niejednorodność siatki, które mogą skutkować deformacjami trudnymi do fizycznej interpretacji.

W celu sprawdzenia, czy uzyskane wyniki są satysfakcjonujące, można opracować fizyczny model w laboratorium do porównania wyników otrzymywanych w rzeczywistości z tymi osiąganymi w obliczeniach przeprowadzanych metodą elementów skończonych.

LITERATURA

- [1] *Technologia*, <https://www.zieta.pl/pl/story/technology> [dostęp: 12.03.2025].
- [2] Malicka Z., *Oskar Zieta – architekt, artysta, rzemieślnik: rozmowa*, <https://architektura.muratorplus.pl/krytyka/oskar-zieta-architekt-artysta-rzemieslnik-rozmowa-aa-v2nN-MszW-hk9U.html> [dostęp: 12.03.2025].
- [3] *Projekty unikalne*, <https://www.zieta.pl/pl/special-projects/all> [dostęp: 12.03.2025].
- [4] *Plopp*, <https://www.zieta.pl/pl/product/plopp?variant=620> [dostęp: 12.03.2025].
- [5] *NAWA*, <https://www.zieta.pl/pl/special-projects/19/nawa> [dostęp: 12.03.2025].
- [6] MSC Software Corporation, *Marc and Mentat Documentation: Release 2020*, <https://simcompanion.hexagon.com/customers/s/article/Marc-Documentation-Release-2020> [dostęp: 12.03.2025].
- [7] Kleiber M., *Mechanika techniczna komputerowe metody mechaniki ciał stałych*, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 1995.
- [8] Waszczyszyn Z., Cichoń C., Radwańska M., *Metoda elementów skończonych w statyczności konstrukcji*, Arkady, Warszawa 1990.
- [9] PN-EN 1993-1-1:2024-10 *Eurokod 3 – Projektowanie konstrukcji stalowych – Część 1-1: Reguły ogólne i reguły dla budynków*.
- [10] PN-EN 1993-1-5:2008 *Eurokod 3 – Projektowanie konstrukcji stalowych – Część 1-5: Blachownice*.
- [11] Rakowski G., Kacprzyk Z., *Metoda elementów skończonych w mechanice konstrukcji*, Wydawnictwo Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2016.
- [12] Zienkiewicz O.C., *Metoda elementów skończonych*, Arkady, Warszawa 1972.
- [13] Sosnowski W., *Numeryczna symulacja, analiza wrażliwości i optymalizacja nieliniowych procesów deformacji konstrukcji*, Wydawnictwo Akademii Bydgoskiej, Bydgoszcz 2003.

Aleksandra Kugler*

ZARZĄDZANIE ŚLADEM WĘGLOWYM W MOTORSPORCIE

Zwiększona świadomość ekologiczna oraz chęć zapobiegania zmianom klimatu powoduje potrzebę badania oraz zarządzania emisjami w różnych aspektach życia i gałęzi przemysłu, w tym motorsportu. Wśród zespołów Formuły Student zauważalny jest trend odchodzenia od technologii spalinowych na rzecz elektrycznych i hybrydowych. Świadomi tego organizatorzy zawodów również wprowadzają do konkurencji statycznych elementy dotyczące ekologii. Artykuł opisuje zakresy oraz sposoby zarządzania emisjami dwutlenku węgla, wytwarzanego przez zespół podczas budowy bolidu elektrycznego typu Formuła Student oraz startów w międzynarodowych zawodach. Ponadto zwraca uwagę na rozwiązania ograniczające ślad węglowy zastosowane w Formule 1 oraz podaje sposoby, które mogłyby wpłynąć na zmniejszenie emisji dwutlenku węgla przez zespoły F1.

CARBON FOOTPRINT MANAGEMENT IN MOTORSPORT

In the face of growing environmental awareness and the urgent need to reduce greenhouse gas emissions, carbon footprint management is becoming an increasingly relevant aspect of motorsport. Among Formula Student teams, there is a noticeable trend of moving away from combustion technologies in favor of electric and hybrid solutions. Competition organizers, aware of these trends, are also introducing elements related to ecology and sustainability into the static events. The aim of this study was to analyze and assess the carbon footprint generated during the design and manufacturing process of a Formula Student electric vehicle, using the Greenhouse Gas Protocol methodology. Based on the conducted calculations, key sources of emissions were identified, and specific strategies for carbon footprint reduction applicable to student teams were proposed. As a point of reference, selected technologies and emission management practices implemented in Formula 1 were reviewed. In addition, a comprehensive analysis was conducted which led to recommendations for reducing carbon dioxide emissions in Formula 1 to achieve carbon neutrality by 2030. The analysis revealed differences in the approach to carbon footprint management between the two motorsport categories. This study represents an attempt to combine an engineering approach to vehicle design with environmental responsibility in the context of competitive motorsport.

* AGH Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica, Wydział Inżynierii Lądowej i Gospodarki Zasobami, Koło Naukowe Kinematics.

1. WSTĘP

Tematem artykułu jest zarządzanie emisjami dwutlenku węgla przez zespół Formuły Student podczas budowy regulaminowego bolidu elektrycznego [1] oraz jego startów w międzynarodowych zawodach. Ponadto analizuje działania podejmowane przez zespoły Formuły 1 w redukowaniu śladu węglowego. Emisja gazów cieplarnianych, w tym dwutlenku węgla, ma wpływ na powstawanie dziury ozonowej i przyspieszenie zmian klimatu. Aby temu zapobiec, firmy coraz częściej decydują się na podjęcie kroków mających na celu zmniejszenie przez nich emisji. Do obliczenia śladu węglowego przedsiębiorstw i organizacji korzysta się z trzech kategorii emisji:

- zakres 1 – emisje bezpośrednie, mające miejsce w firmie,
- zakres 2 – emisje pośrednie, wytworzone w wyniku pozyskania energii elektrycznej i ciepłej,
- zakres 3 – emisje pośrednie, wynikające z łańcucha dostaw.

Zakresy te zostały opracowane przez GHG – Greenhouse Gas Protocol (po polsku tłumaczony jako Protokół Gazów Cieplarnianych) [2].

Formuła Student to jedno z najbardziej prestiżowych zawodów inżynierskich dla studentów z całego świata. Aby w nich wystartować, należy co roku zaprojektować i zbudować regulaminowy [1] bolid elektryczny – spalinowy lub hybrydowy.

Wśród zespołów zauważalne jest odchodzenie od technologii spalinowych na rzecz elektrycznych i hybrydowych. Świadomi trendów organizatorzy zawodów wprowadzają do konkurencji statycznych elementy ekologii. W 2024 roku na zawodach Formula Student France [3] jednym z aspektów, które trzeba było poruszyć w konkurencji Design Engineering, był *carbon footprint*, czyli ślad węglowy wytworzony przez zespół podczas wszystkich faz projektowania i budowy samochodu. Na zawodach FSAE Michigan 2024 [4] tematem konkurencji Sales Presentation było przejście z technologii spalinowej na inną wybraną technologię – sędziowie zwracali uwagę na jej ekologiczność.

Od 2025 roku elementem konkurencji Cost & Manufacturing we wszystkich zawodach bazujących na regulaminie Formula Student Germany [1] jest „Costed Carbonized Bill of Material”, czyli dokument opisujący szczegółowo procesy produkcyjne i montażowe, rzeczywiste koszty i emisję gazów cieplarnianych związaną z produkcją części jednego lub dwóch systemów. Dokument ten pozwala określić ilość emisji gazów cieplarnianych powstających przy budowie wybranego systemu wchodzącego w skład bolidu. Takie działania zwracają uwagę na emisję dwutlenku węgla przez zespoły Formuły Student.

W sezonie 2024 AGH Racing buduje bolid elektryczny i startuje w zawodach FS France. Na ich podstawie zostały przeprowadzone poniższe obliczenia.

Formuła 1 jest matką motorsportów i ma zdecydowanie większy format niż Formuła Student. Do 2030 roku F1 zobowiązała się do osiągnięcia neutralności emisyjnej (*Net Zero Carbon*). W tym celu musi bezwzględnie zredukować emisję dwutlenku węgla o co najmniej 50% względem 2018 roku. Osiągnięcie spadku tej redukcji nie będzie możliwe bez zwiększania świadomości wśród zespołów, inżynierów, kierowców i kibiców; opracowywania innowacyjnych technologii oraz zrównoważonego zarządzania wszystkimi procesami w Formule 1.

2. METODOLOGIA

2.1. OBLICZENIA I ZAKRESY EMISJI DWUTLENKU WĘGLA W CYKLU ŻYCIA BOLIDU ELEKTRYCZNEGO TYPU FORMUŁA STUDENT

Zakres 1

Emisje bezpośrednie powstałe w wyniku spalania paliw w stacjonarnych lub mobilnych źródłach, będących w posiadaniu zespołu AGH Racing, wyniosły łącznie 4050,56 kg CO₂. W skład emisji z zakresu 1 wchodzi emisje powstałe przez spalanie paliw kopalnych w pojazdach i systemach grzewczych należących do organizacji. W przypadku zespołu Formuły Student ogranicza się to do emisji wytworzonych podczas dojazdów na testy bolidu i na zawody oraz w wyniku ogrzewania przestrzeni garażowych. Według standardów Unii Europejskiej [5] furgonetka wytwarza średnio 120 g dwutlenku węgla na 1 km. Trzy busy należące do AGH Racing pokonują średnio w ciągu roku 26 500 km, co daje 3175,56 kg wyemitowanego CO₂. Do ogrzania garażu zimą używanych jest pięć grzejników, które działają średnio przez pięć godzin w ciągu dnia i zużywają 1250 kWh przez 50 dni. Energia zasilająca grzejniki emituje 875 kg CO₂.

Zakres 2

Zakres 2 to kategoria emisji pośrednich, które powstały w wyniku wytwarzania zużywanej przez zespół energii elektrycznej, pary technologicznej i ciepła. W przypadku AGH Racing, to właśnie z tej kategorii pochodzi najwięcej emisji. Dzieje się tak, ponieważ 85% bolidu jest wytwarzane w garażu na maszynach należących do organizacji. Wszystkie urządzenia zużywają łącznie 140 kW energii. Niestety większość energii elektrycznej w Polsce jest wytwarzana w wyniku spalania paliw kopalnych, które są zdecydowanie bardziej emisyjne od energii odnawialnej. Według danych Polskiego Instytutu Ekonomicznego [6] miks energetyczny w Polsce emituje 700 CO₂ ekw/kWh, co w porównaniu ze średnią europejską daje ponad trzy razy więcej emisji dwutlenku węgla do atmosfery. Zakładając, że na maszynach pracujemy przez 1000 godzin rocznie, to zużywamy 140 000 kWh. Emisja pośrednia wynosi więc około 98 t CO₂.

Zakres 3

Zakres 3 to kategoria emisji pośrednich wytworzonych w całym łańcuchu dostaw. Obejmuje 15 różnych kategorii podzielonych na dwie grupy:

1. *Upstream* – emisje wytworzone do momentu uzyskania finalnego produktu. Do tego zakresu zaliczamy emisje powstałe podczas produkcji materiałów, elementów wytworzonych przez dostawców, dojazdów pracowników oraz utylizacji odpadów.
2. *Downstream* – emisje wytworzone w dalszym życiu produktu, np. jego transport, użytkowanie oraz utylizacja odpadów po nim.

Dzięki temu, że 85% elementów bolidu zostało wykonane przez zespół na własnych maszynach, CO₂ wytworzone w tej kategorii jest zdecydowanie mniejsze niż powstałe w ramach zakresu 2. Ogranicza się ono do wyprodukowania materiałów, dojazdów studentów,

części wykonanych przez sponsorów oraz utylizacji śmieci. Do budowy bolidu zużywa się najwięcej aluminium oraz mieszanki włókna węglowego z żywicą epoksydową. Do wykonania części potrzebnych do bolidu elektrycznego wykorzystano 500 kg aluminium oraz 40 kg włókna węglowego z żywicą epoksydową. Według danych International Aluminium Institute [7] przy produkcji 1 t aluminium pierwotnego powstaje 15,1 t dwutlenku węgla. Produkcja 1 kg kompozytu zbudowanego z żywicy epoksydowej i włókien węglowych może generować około 20–30 kg CO₂ [8]. W takim przypadku produkcja materiałów potrzebnych do budowy bolidu emituje 8350 kg dwutlenku węgla. Najtrudniejsze do obliczenia śladu węglowego są części pozyskane u partnerów i dostawców (tab. 1). Nie dysponujemy konkretnymi danymi w tej kwestii, więc oszacowaliśmy je na podstawie danych przy produkcji samochodów elektrycznych Tesla [9] oraz ilości materiałów takich jak aluminium potrzebnych do ich skonstruowania [10]. Części dostarczane przez zewnętrzne firmy emitują prawdopodobnie około 3753 kg CO₂.

Tabela 1. Lista części pozyskanych u zewnętrznych firm i szacowana emisja CO₂

Części	Kilogramy wyemitowanego CO ₂
Silniki, przekładnie	2488
Akumulator	800
Falowniki	415
Pompy hamulcowe, amortyzatory, chłodnice, pompy wody	50

Garaz AGH Racing znajduje się 8 km od kampusu, gdzie mieszka większość członków zespołu. Zakładając, że każdy z nich dojeżdżałby do garażu autobusem 250 dni w roku, to pokonałby trasę 4000 km. Standardowy autobus miejski produkuje 880 g CO₂ na kilometr, co łącznie daje 3520 kg CO₂ rocznie [11]. Utylizacja odpadów to kolejny ciężki do obliczenia aspekt, ponieważ nie znamy konkretnej liczby kilogramów śmieci wyprodukowanych przez zespół oraz w jaki sposób zostały one zutylizowane przez zewnętrzną firmę. Według rozporządzenia Ministra Środowiska [12] 42% emisji CO₂ pochodzącej ze spalania odpadów komunalnych jest klasyfikowana jako emisja ze źródeł odnawialnych i nie jest wliczana do bilansu emisji CO₂. W takim przypadku poziom emisji CO₂ mieści się w zakresie 80–90 kg/MW.

2.2. OPTIMALIZACJA KALENDARZA WYŚCIGOWEGO F1

Kalendarz wyścigowy na 2025 rok obejmuje 24 Grand Prix na pięciu różnych kontynentach. W tabeli 2 zestawiono wszystkie połączenia między miastami, w których odbywają się wyścigi. Za miejsce bazowe przyjęto Londyn, ponieważ większość zespołów Formuły 1 ma siedziby w Anglii. W zależności od miejsca siedziby drużyny odległości te będą się nieco różnić. W odstępach między weekendami wyścigowymi dłuższymi niż tydzień założono, że

zespoły te wracają do swojej siedziby na czas przerwy. W przypadku takiego kalendarza wyścigowego jeden samolot pokonuje 143 511 km. To ponad 3,5 razy większa odległość niż obwód Ziemi! Samolot rejsowy emituje średnio 1291,6 t dwutlenku węgla podczas przelotu na dystansie 143 511 km. Jest to emisja przypadająca na jeden samolot, który może pomieścić średnio 200 osób. W Formule 1 rywalizuje aktualnie 10 zespołów, z których każdy zatrudnia około 900 pracowników. Przy założeniu, że na każdy wyścig podróżuje jedynie 100 osób z każdego zespołu, konieczne jest użycie co najmniej pięciu samolotów rejsowych. Część kierowców F1 czy szefów zespołów korzysta z prywatnych odrzutowców, co dodatkowo zwiększa ślad węglowy. Jeden prywatny odrzutowiec podczas przebycia takich tras może emitować około 287 t CO₂. Łączna emisja dwutlenku węgla wynikająca z przelotu pięciu samolotów rejsowych i pięciu odrzutowców wynosi więc 7893 t.

Jeśli przyjrzeć się kalendarzowi wyścigów Formuły 1, szczególnie rzuca się w oczy rozplanowanie aż trzech wyścigów w Stanach Zjednoczonych w różnych częściach sezonu. Ulokowanie wyścigu w Miami budzi poważne wątpliwości, ponieważ przed nim zawody odbywają się na Bliskim Wschodzie, a zaraz po nim – w Europie. Podobna sytuacja dotyczy wyścigu w Kanadzie – weekendy wyścigowe przed zawodami i po nich przypadają w Europie. Rozbicie wyścigów w Azji i na Bliskim Wschodzie na dwie różne części sezonu również budzi wątpliwość, jeśli chodzi o zmniejszenie emisji przy podróżach, ale w tym przypadku decyzja wydaje się mieć uzasadnienie w trudnych warunkach pogodowych panujących w tych regionach w określonych porach roku.

Zaproponowana w artykule optymalizacja kalendarza wyścigowego zakłada organizację Grand Prix w Stanach Zjednoczonych i Kanadzie tydzień po tygodniu. Główną redukcję pokonywanych kilometrów zapewnia mniejsza liczba lotów transatlantyckich oraz rezygnacja z ponownego lotu z Brazylii do Stanów Zjednoczonych. Optymalizacja kalendarza wyścigowego pozwoliłaby zredukować długość tras do 109 034 km, czyli aż o 24%. Ślad węglowy zmniejszyłby się wtedy do 5996,87 t CO₂.

Tabela 2. Odległości przed optymalizacją kalendarza

Miejsce A	Miejsce B	Odległość [km]
Londyn	Melbourne	17 000
Melbourne	Szanghaj	8000
Szanghaj	Suzuka	1465
Suzuka	Bahrajn	8000
Bahrajn	Dżedda	1260
Dżedda	Londyn	4745
Londyn	Miami	7126
Miami	Londyn	7126

Tabela 2 cd.

Miejsce A	Miejsce B	Odległość [km]
Londyn	Imola	1184
Imola	Monaco (Nicea)	400
Monaco (Nicea)	Barcelona	505
Barcelona	Londyn	1140
Londyn	Montreal	5222
Montreal	Londyn	5222
Londyn	Spielberg	1178
Spielberg	Silverstone (Londyn)	1178
Londyn	Bruksela (SPA)	441
Bruksela	Budapeszt	1010
Budapeszt	Londyn	1450
Londyn	Zandvoort	330
Zandvoort	Monza (Mediolan)	1228
Mediolan	Londyn	1371
Londyn	Baku	3974
Baku	Singapur	6943
Singapur	Londyn	10 855
Londyn	Austin	7910
Austin	Mexico City	1213
Mexico City	Sao Paulo	7446
Sao Paulo	Las Vegas	9781
Las Vegas	Lusail	13 023
Lusail	Abu Dhabi	312
Abu Dhabi	Londyn	5473
Suma		143 511

3. ROZWIĄZANIA W CELU ZMNIEJSZENIA EMISJI DWUTLENKU WĘGLA

3.1. ROZWIĄZANIA DLA FORMUŁY STUDENT

Produkcja jednego bolidu elektrycznego klasy Formuła Student emituje łącznie ponad 118 t CO₂. AGH Racing liczy średnio 125 członków, więc emisja dwutlenku węgla na jedną osobę wynosi około 945 kg. Dla porównania produkcja jednego samochodu elektrycznego Tesla emituje 17,5 t CO₂. Musimy jednak pamiętać, że przy budowie bolidu Formuły Student nie możemy mówić o masowej produkcji, przez co część emisji jest zdecydowanie większa. Aby zmniejszyć ślad węglowy wytwarzany przez zespół Formuły Student w Polsce, przydatne mogą być następujące działania:

- zmiana źródła energii elektrycznej na mniej emisyjne, np. przez zamontowanie paneli słonecznych na dachu garażu zespołu;
- zwiększenie liczby symulacji przed wykonaniem poszczególnych elementów, aby zmniejszyć liczbę iteracji części, co pomoże zminimalizować ilość użytych materiałów;
- korzystanie z carpoolingu, co pozwoli zmniejszyć ślad węglowy powstały podczas dojazdów do garażu;
- wykorzystywanie materiałów z recyklingu
- wprowadzenie rozwiązań z modelu GOZ, czyli gospodarki o obiegu zamkniętym (*make, use, reuse, remake, recycle*).

3.2. ROZWIĄZANIA DLA FORMUŁY 1

Formuła 1 zobowiązała się do osiągnięcia *Net Zero Carbon* do 2030 roku [13]. Aby to zrobić, musi zredukować emisję dwutlenku węgla o co najmniej 50% względem 2018 roku. Sport ten w pierwszej kolejności stawia na ograniczenie emisji na podróżowanie, logistykę i zużycie energii w fabrykach na ograniczenie emisji wynikających z podróżowania, logistyki i zużycia energii w fabrykach. Do 2022 roku Formule 1 udało się zmniejszyć ślad węglowy o 13% względem 2018 roku. Wszystkie zespoły Formuły 1 zobowiązały się do zasilania swoich bolidów w 100% zaawansowanymi, zrównoważonymi paliwami do 2026 roku. Co ciekawe, emisje paliw z bolidów jeżdżących na torze odpowiadają za mniej niż 1% całkowitego śladu węglowego związanego z tą dyscypliną sportu.

Wykorzystanie włókna węglowego z recyklingu

W 2023 roku zespół McLaren wraz ze swoim partnerem V Carbon stał się pionierem, jeśli chodzi o wykorzystanie najnowocześniejszych włókien węglowych z recyklingu [14]. Ich użycie ma pozwolić na redukcję emisji w cyklu życia włókna o 90% w porównaniu ze standardowym włóknem węglowym. Odpowiada to 27 t emisji dwutlenku węgla na każdą tonę użytego materiału. Gdyby tylko 1% włókna węglowego wyprodukowanego na całym świecie w 2022 roku było włóknem z recyklingu, zaoszczędziłoby to ponad 32 000 t emisji dwutlenku węgla, co odpowiada połowie całkowitej emisji McLaren Racing. Po pierwszych sukcesach w wykorzystaniu włókna węglowego z recyklingu McLaren planuje zwiększyć

użycie tego materiału w swoich bolidach, dążąc tym do zamknięcia obiegu w produkcji włókien. Produkcja samochodu F1 jest jednym z największych czynników przyczyniających się do ogólnego śladu węglowego zespołów F1. Zwiększenie wykorzystania bardziej zrównoważonych materiałów ma zatem ogromny potencjał, aby pomóc w zmniejszeniu emisji.

Ferrari jako przykład firmy ze zrównoważonym zarządzaniem śladem węglowym

Według Center for Climate and Energy Solutions na całym świecie główne źródła emisji gazów cieplarnianych to m.in. wytwarzanie energii elektrycznej i ciepłej, transport oraz produkcja. Ferrari jako producent samochodów oraz zespół konkurujący w zawodach na całym świecie generuje znaczne ilości gazów cieplarnianych. Od 2021 roku firma oblicza swój ślad węglowy zgodnie z wytycznymi Greenhouse Gas Protocol [15]. Ferrari zobowiązało się do osiągnięcia całkowitej neutralności węglowej do 2030 roku – zarówno w zakresie emisji pośrednich, jak i bezpośrednich, obejmujących cały łańcuch wartości. Już obecnie firma realizuje założenia porozumienia paryskiego z 2015 roku. Ich celem jest zmniejszenie o co najmniej 90% emisji z zakresu 1 i 2 do 2030 roku w porównaniu z poziomem z 2021 roku.

Ferrari zadeklarowało również zredukowanie emisji z zakresu 3 (na każdy samochód) o co najmniej 40%, koncentrując się głównie na materiałach i fazach użytkowania pojazdu (*upstream*: –30%, zaś *downstream*: –50% – na samochód do 2030 roku w porównaniu z 2021 rokiem). Aktualnie firma udoskonala swoje elektryczne i hybrydowe układy napędowe. Największe ilości ich emisji pochodzą z zakresu 3, więc skupia się na ograniczeniu *upstreamu*, czyli emisji powstałych do momentu wytworzenia gotowego produktu wraz z logistyką, podróżami służbowymi; zakupionymi surowcami i usługami (np. sprzęt biurowy, woda, odpady powstałe z produkcji itp.). Aby zapewnić uczciwe oraz szeroko zakrojone działania na poziomie globalnym, skupiają się na korzystaniu z materiałów pochodzących z recyklingu oraz rozwoju innowacyjnych technologii. Dodatkowo obligują swoich dostawców do dekarbonizacji. Z dostępnych danych wynika, że w 2023 roku emisje Ferrari z zakresu 1 i 2 wyniosły 78 kt CO₂. Najwięcej dwutlenku węgla emitowane jest w zakresie 3 z pośredniego *upstreamu* (pozyskanie surowców do produkcji aut drogowych, logistyka, podróże służbowe oraz inne materiały). Emisje wytworzone w *upstreamie* wyniosły 451 kt CO₂, a w *downstreamie* – 291 kt CO₂. W 2008 roku na terenie zakładu produkcyjnego Ferrari zainstalowano panele słoneczne i od tego czasu sukcesywnie zwiększa się ich liczbę. Od 2014 roku firma kupuje energię elektryczną z certyfikatem gwarancji pochodzenia. Od 2021 roku 100% energii elektrycznej kupowanej z sieci do zakładów produkcyjnych Ferrari wytwarzana jest ze źródeł odnawialnych. Od 2009 roku zaczęto wykorzystywać energię elektryczną wraz z ciepłem i zimną wodą wytwarzaną w instalacji trigeneracyjnej, co pozwoliło na optymalizację zużycia energii. W 2023 roku instalacja trigeneracyjna i elektrownia tlenkowych ogniów paliwowych wyprodukowała 67% zapotrzebowania na energię elektrowni w Maranello. Pozostałe 33% pokryły natomiast odnawialne źródła energii. W 2023 roku trigenerator wyprodukował 95 GWh energii elektrycznej. Całkowite zużycie energii w grupie Ferrari w 2023 roku wyniosło 1520 TJ, czyli o 4% mniej w stosunku do 2022 roku (1580 TJ). Przedsiębiorstwo od 2009 do 2024 roku korzystało z instalacji trigeneracyjnej zasilanej gazem w swojej fabryce w Maranello. Próbując zmniejszyć znaczną część zużycia metanu na odnawialne źródła energii, firma podjęła decyzję o jej zamknięciu. Dzięki zwiększeniu instalacji systemów

fotowoltaicznych Ferrari zamierza podwoić produkcję energii słonecznej. Z komunikatu prasowego wynika, że do 2030 roku firma planuje wyprodukować około 10 MW energii słonecznej. Włoska firma stwierdziła, że zamknięcie fabryki, która od 2009 roku wytwarza energię elektryczną, ciepło i chłodzenie dla Ferrari, pomoże zmniejszyć zużycie metanu o 70% i ograniczyć roczne emisje w zakresach 1 i 2 o 60%.

Optymalizacja kalendarza wyścigowego

Mimo znaczącego postępu technologicznego w Formule 1 nadal istnieją obszary, w których możliwe jest istotne ograniczenie emisji gazów cieplarnianych. Największy ślad węglowy powstaje w związku z podróżami na zawody oraz całą towarzyszącą im logistyką. Kalendarz wyścigów na 2025 rok zakłada dwadzieścia cztery Grand Prix na pięciu kontynentach (rys. 1).



2025 CALENDAR

*RACE ON SATURDAY

R1	 14-16 MAR AUSTRALIA MELBOURNE	R13	 25-27 JUL BELGIUM SPA
R2	 21-23 MAR CHINA SHANGHAI	R14	 01-03 AUG HUNGARY BUDAPEST
R3	 04-06 APR JAPAN SUZUKA	R15	 29-31 AUG NETHERLANDS ZANDVOORT
R4	 11-13 APR BAHRAIN SAKHIR	R16	 05-07 SEP ITALY MONZA
R5	 18-20 APR SAUDI ARABIA JEDDAH	R17	 19-21 SEP AZERBAIJAN BAKU
R6	 02-04 MAY USA MIAMI	R18	 03-05 OCT SINGAPORE SINGAPORE
R7	 16-18 MAY ITALY IMOLA	R19	 17-19 OCT USA AUSTIN
R8	 23-25 MAY MONACO MONACO	R20	 24-26 OCT MEXICO MEXICO CITY
R9	 30 MAY-01 JUN SPAIN BARCELONA	R21	 07-09 NOV BRAZIL SÃO PAULO
R10	 13-15 JUN CANADA MONTREAL	R22	 20-22 NOV USA LAS VEGAS
R11	 27-29 JUN AUSTRIA SPIELBERG	R23	 28-30 NOV QATAR LUSAIL
R12	 04-06 JUL UNITED KINGDOM SILVERSTONE	R24	 05-07 DEC ABU DHABI YAS MARINA

*SAT RACE

Rys. 1. Kalendarz Grand Prix Formuły 1 na 2025 rok

Źródło: [<https://www.formula1.com/>]

Obecny układ kalendarza wyścigów Formuły 1 nie jest zoptymalizowany pod kątem logistyki, przez co emisje z transportu są bardzo wysokie. Z szacunkowych obliczeń wynika, że redukcja lotów transatlantycznych mogłaby zmniejszyć emisje dwutlenku węgla o prawie 25%.

Podsumowując, aby zmniejszyć ślad węglowy w motorsporcie, należy:

- kontynuować zwiększanie świadomości wśród inżynierów, inwestorów oraz fanów motorsportu,
- zmieniać źródła energii na mniej emisyjne,
- optymalizować kalendarze wyścigów,
- korzystać z materiałów z recyklingu,
- stosować model gospodarki o obiegu zamkniętym.

4. WNIOSKI

Motorsport należy do wysokoemisyjnych branż, obejmujących m.in. produkcję pojazdów, transport, globalne podróże, organizację masowych wydarzeń i same wyścigi. Aby zmniejszyć jego wpływ na środowisko, niezbędne jest odpowiedzialne zarządzanie emisjami i wdrażanie nowych technologii. W poszczególnych kategoriach motorsportu występują różnice, jeśli chodzi o zaawansowanie technologiczne oraz wysokość budżetów, jakimi dysponują zespoły. Widać to zwłaszcza na przykładzie Formuły 1 oraz Formuły Student. Zespoły biorące udział w zawodach Formuły Student dysponują o wiele mniejszymi budżetami i zazwyczaj nie mają dostępu do najnowocześniejszych technologii. W rezultacie możliwości ograniczania ich śladu węglowego są znacznie zawężone. Ponadto wszystkie zespoły Formuły Student są zależne od uczelni, które reprezentują. W ich przypadku decyzje dotyczące wykorzystania niskoemisyjnych źródeł energii zależą od władz uczelni, a nie bezpośrednio od zespołów. W przeciwieństwie do Formuły Student, Formuła 1 oraz zespoły do niej należące dysponują ogromnymi środkami finansowymi. Mają również partnerów mogących im pomóc w ograniczeniu śladu węglowego. Mimo działań podejmowanych w całej branży konieczne jest weryfikowanie i obserwowanie, czy organizacje i zespoły nie dopuszczają się greenwashingu. Część z firm, np. Ferrari, stawia na przejrzystość w informowaniu o swoich działaniach na rzecz zmniejszania śladu węglowego przez publikowanie szczegółowych rocznych raportów. Wprowadzenie obowiązkowych raportów na temat emisyjności dla wszystkich zespołów w Formule 1 pomogłoby zwiększyć przejrzystość działań firm, a co za tym idzie ograniczyłoby zjawisko greenwashingu. W całej branży dalej pozostają obszary działalności, których emisyjność utrzymuje się na wysokim poziomie. Kluczowymi krokami dla zrównoważonej przyszłości motorsportu są:

- zwiększenie świadomości ekologicznej wśród inżynierów, inwestorów i kibiców,
- wprowadzenie obowiązkowych raportów o emisyjności
- przejście na mniej emisyjne źródła energii,
- optymalizacja logistyki i transportu,
- szersze wykorzystanie materiałów z recyklingu,
- wdrażanie zasad gospodarki o obiegu zamkniętym.

LITERATURA

- [1] Formula Student Germany, *Rules*, https://www.formulastudent.de/fileadmin/user_upload/all/2024/rules/FS-Rules_2024_v1.1.pdf [dostęp: 13.02.2024].
- [2] Greenhouse Gas Protocol, *Technical Guidance for Calculating Scope 3 Emissions (version 1.0). Supplement to the Corporate Value Chain (Scope 3)*, World Resources Institute & World Business Council for Sustainable Development, 2013, https://ghgprotocol.org/sites/default/files/standards/Scope3_Calculation_Guidance_0.pdf [dostęp: 10.09.2024].
- [3] Formula Student France, *Competition Handbook*, <https://fs-france.com/wp-content/uploads/2024/08/FSF24CompetitionHandbookv1-4-2.pdf> [dostęp: 6.08.2024].
- [4] Formula SAE Michigan, *Series Resources*, <https://www.fsaeonline.com/cdsweb/gen/DocumentResources.aspx> [dostęp: 17.01.2024].
- [5] „Gotowi na 55”: dlaczego UE zaostrza normy emisji CO₂ dla aut i furgonetek, <https://www.consilium.europa.eu/pl/infographics/fit-for-55-emissions-cars-and-vans/> [dostęp: 27.01.2024].
- [6] Juszczak A., *Koszt emisji CO₂ w produkcji 1 MWh w Polsce 3-krotnie wyższy niż średnia unijna*, Polski Instytut Ekonomiczny, https://pie.net.pl/wp-content/uploads/2022/09/Tygodnik-PIE_36-2022.pdf [dostęp: 8.09.2022].
- [7] International Aluminium Institute, *Primary Aluminium Greenhouse Gas Emissions Intensity*, <https://international-aluminium.org/statistics/greenhouse-gas-emissions-intensity-primary-aluminium/> [dostęp: 29.11.2023].
- [8] Kompozyty.net, *Ślad węglowy (carbon footprint) kompozytów epoksydowych*, <https://kompozyty.net/slady-weglowe-carbon-footprint-kompozytow-epoksydowych%E2%82%AC%80%E2%82%AC/> [dostęp: 27.02.2023].
- [9] Elektrowoz.pl, *Jaki jest ślad emisyjny przy produkcji ogniw Li-ion?*, <https://elektrowoz.pl/magazyny-energii/jaki-jest-slady-emisyjny-przy-produkcji-ogniw-li-ion-ile-powstaje-co2-przy-produkcji-1-kwh-baterii-opracowanie/> [dostęp: 29.04.2022].
- [10] Kulik R., *Czy samochód elektryczny jest bardziej ekologiczny – Katowice dla odmiany... klimatu*, Katowice 2018, <https://www.katowice.eu/SiteAssets/dla-mieszka%C5%84ca/eko-artyku%C5%82y/Czy%20samoch%C3%B3d%20elektryczny%20jest%20bardziej%20ekologiczny%20E2%80%93%20katowice%20dla%20odmiany%20klimatu.pdf> [dostęp: 10.02.2023].
- [11] Ekologia.pl, *Niższa emisja dwutlenku węgla dzięki buspasom*, <https://www.ekologia.pl/styl-zycia/nizsza-emisja-dwutlenku-wegla-dzieki-buspasom/> [dostęp: 12.10.2023].
- [12] Wielgosiński G., *21 faktów dotyczących spalarni odpadów*, <https://www.nowysacz.pl/content/resources/Srodowisko/2022/Wielgosinski-21-faktow-dotyczacych-spalarni-odpadow.pdf> [dostęp: 10.02.2022].
- [13] Formula 1, *Net Zero Carbon by 2030*, <https://corp.formula1.com/impact/net-zero-carbon/> [dostęp: 26.02.2025].

- [14] McLaren, *McLaren Racing pioneers use of sustainable materials with innovative recycled carbon fibre trial*, <https://www.mclaren.com/racing/formula-1/2023/mclaren-racing-pioneers-use-of-sustainable-materials-with-innovative-recycled-carbon-fibre-trial/> [dostęp: 12.10.2023].
- [15] Ferrari, *Ferrari N.V. 2023 Annual Report I and Form 20-F*, https://cdn.ferrari.com/cms/network/media/pdf/Ferrari-2023-annual-report-april-17-2024.pdf?_gl=1*8t6rnx*_ga*ODA1MTM2NzQuMTczMzQzOTYzMg..*_ga_JM1HT9B412*MTc0MDU3MzcwMi4xMi4xLjE3NDA1NzM3MTkuMC4wLjExMjUzNjk4NzA. [dostęp: 17.04.2024].

Aleksandra Lis*, Karolina Wolska*, Anna Przewięzlikowska**

REALIZACJA OSNOWY GEODEZYJNEJ POZIOMEJ NA POTRZEBY OBSŁUGI ZAMKU KRÓLEWSKIEGO NA WAWELU

Tematem artykułu jest przedstawienie procesu realizacji osnowy geodezyjnej poziomej w kontekście obsługi jednego z najważniejszych zabytków Polski – Zamku Królewskiego na Wawelu. Osnowa geodezyjna, będąca zbiorem punktów o znanych współrzędnych, pozwala na dokładne wyznaczenie, w odniesieniu do niej, położenia elementów infrastruktury oraz monitorowanie przemieszczeń. Jest to szczególnie istotne w przypadku zabytków takich jak Wawel, gdzie nawet najmniejsze zmiany w stabilności wzgórz i budynków mogą mieć poważne konsekwencje. W artykule zostaną omówione kluczowe aspekty związane z projektowaniem, stabilizacją oraz pomiarami geodezyjnej osnowy poziomej wraz z analizą uzyskanych danych, w celu zapewnienia najwyższej precyzji i wiarygodności wyników.

ESTABLISHMENT OF A HORIZONTAL GEODETIC CONTROL GRID FOR THE SERVICE OF THE WAWEL ROYAL CASTLE

The article focuses on the process of establishing a horizontal geodetic control network in the context of servicing one of Poland's most significant historical monuments – Wawel Royal Castle. A geodetic control network, consisting of reference points with known coordinates, enables precise positioning of infrastructure elements and monitoring of displacements. This is particularly crucial for monuments like Wawel, where even the slightest changes in structural stability can have serious consequences for preserving cultural heritage. The article will discuss key aspects related to the design, stabilization, and measurements of the horizontal geodetic control network, along with an analysis of the obtained data to ensure the highest accuracy and reliability of the results.

* AGH Akademia Górniczo-Hutnicza, Wydział Geodezji Górniczej i Inżynierii Środowiska, KNGK Geoinformatyka.

** AGH Akademia Górniczo-Hutnicza, Wydział Geodezji Górniczej i Inżynierii Środowiska, Katedra Geodezji Zintegrowanej i Kartografii.

1. WSTĘP

Osnowa geodezyjna to usystematyzowany zbiór punktów, dla których precyzyjnie określono położenie, z wymaganą dokładnością, w jednolitym układzie współrzędnych obowiązującym na terenie całego kraju [1]. Jest ona niezwykle istotna zarówno podczas realizacji nowych inwestycji budowlanych, jak i w przypadku zachowania dziedzictwa architektonicznego dla przyszłych pokoleń. Wszelkie prace renowacyjne wymagają przeprowadzenia pomiarów geodezyjnych, a osnowa geodezyjna stanowi ich podstawę, zapewniając niezbędną dokładność w dokumentowaniu, ochronie i monitorowaniu zabytkowych obiektów [2]. Zamek Królewski na Wawelu w wyniku licznych prac konserwatorskich przeprowadzonych w XX i XXI wieku utracił swoją osnowę. W 2024 roku udało się zaprojektować, zastabilizować, pomierzyć oraz wyrównać nową, kompletną sieć poziomej osnowy geodezyjnej, która jest fundamentem dalszych prac badawczo-pomiarowych, umożliwiając efektywne zarządzanie i ochronę dziedzictwa kulturowego.

2. ANALIZA MATERIAŁÓW ARCHIWALNYCH

W ramach realizacji projektu poziomej osnowy geodezyjnej na terenie Zamku Królewskiego na Wawelu dokonano szczegółowego przeglądu dokumentacji pomiarowej zgromadzonej w archiwum zamku. Przeprowadzone badanie materiałów archiwalnych umożliwiło ustalenie, że ostatnia osnowa geodezyjna na wzgórzu wawelskim została założona w 1953 roku pod kierownictwem prof. dr. inż. arch. Jerzego Gomoliszewskiego. Prace te miały na celu wyznaczenie precyzyjnej sieci poziomej obejmującej obszar Wawelu, z wyłączeniem wnętrz budynków.

Archiwalne współrzędne zostały obliczone w Układzie Lokalnym Krakowskim (ULK). W celu przeprowadzenia analizy opracowano kod w języku Python, umożliwiający transformację współrzędnych z ULK do Państwowego Układu Współrzędnych Geodezyjnych 2000 (PUWG 2000) i bazujący na istniejących algorytmach [3]. Wyniki przeprowadzonej transformacji ujawniły istotne rozbieżności. Punkty, które zgodnie z istniejącymi danymi miały znajdować się na terenie Wawelu, w rzeczywistości wskazywały lokalizacje poza granicami Polski. W związku z tym ponownie przeanalizowano operat pomiarowy i dostrzeżono istotną niezgodność w zapisie danych. Współrzędne punktów miały przeciwną polaryzację – współrzędna X była oznaczona znakiem dodatnim, a Y ujemnym, co było sprzeczne z charakterystyką ULK.

Po dokonaniu korekty znaków współrzędnych X i Y przeprowadzono ponowną transformację i punkty osnowy znalazły się w obrębie wzgórza wawelskiego. Po naniesieniu współrzędnych w Państwowym Układzie Współrzędnych Geodezyjnych 2000 (PL-2000) na mapę przeprowadzono wywiad terenowy w celu weryfikacji obecności punktów osnowy w ich pierwotnych lokalizacjach.

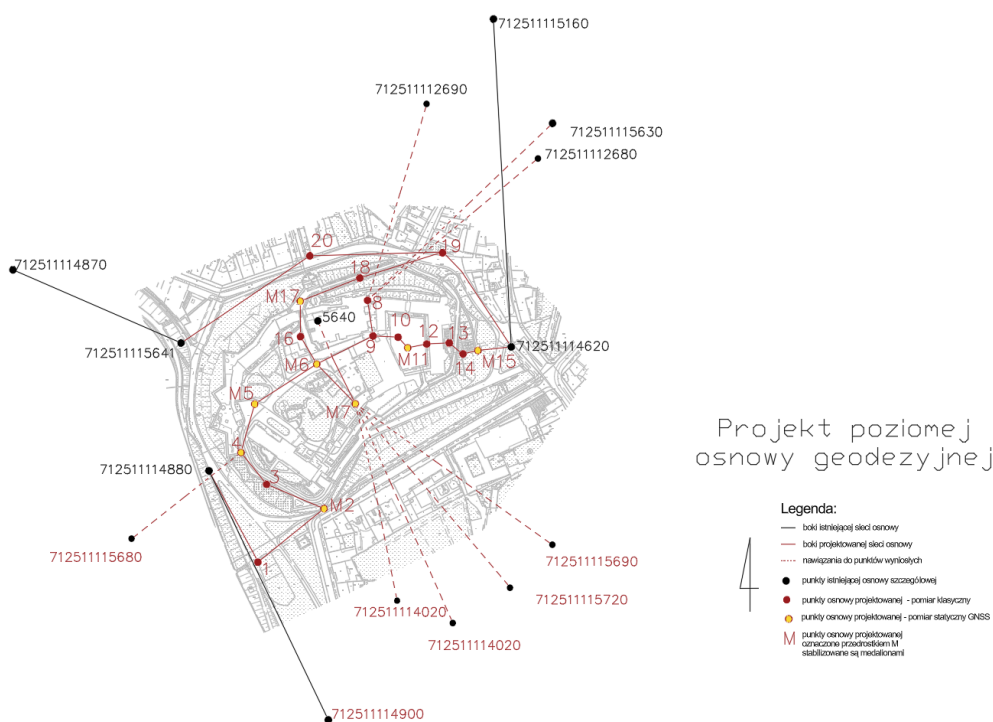
Pomimo przeprowadzonej stabilizacji żaden z punktów osnowy geodezyjnej założonej w 1953 roku nie zachował się do dziś. Najprawdopodobniej uległy one zniszczeniu w wyniku

licznych prac konserwatorskich, archeologicznych oraz innych działań prowadzonych na wzgórzu na przestrzeni lat. Podczas realizacji tych prac nie przykładano należytej wagi do ochrony punktów osnowy geodezyjnej, a po ich zakończeniu nie podjęto działań mających na celu ich odtworzenie, co ostatecznie doprowadziło do całkowitego zniszczenia osnowy.

W wyniku przeprowadzonej analizy oraz wywiadu terenowego ujawniono, że zamek nie ma osnowy geodezyjnej, co utrudnia przeprowadzanie precyzyjnych pomiarów geodezyjnych, niezbędnych do działań renowacyjnych.

3. PROJEKT SIECI

W ramach przygotowań do pomiaru geodezyjnego zaprojektowano nową sieć osnowy poziomej geodezyjnej (rys. 1), która obejmuje 20 nowych punktów, sześć adaptowanych punktów szczegółowej osnowy miejskiej (istniejące punkty, które zostały włączone do zakładanej sieci osnowy), a także osiem punktów osnowy geodezyjnej na obiektach wyniosłych, stanowiących nawiązanie w pomiarach kąto-liniowych. Rozmieszczenie punktów zaplanowano w taki sposób, aby obejmowały one swoim zasięgiem całe wzgórze wawelskie i uwzględniały topografię terenu oraz specyfikę obiektów architektonicznych znajdujących się na tym obszarze.



Rys. 1. Projekt poziomej osnowy geodezyjnej na tle zabudowy Wawelu

4. NAWIĄZANIE

Prawidłowe wykonanie pomiarów geodezyjnych wymaga nawiązania do podstawowej osnowy geodezyjnej poziomej znajdującej się na obszarze opracowania [4]. W przypadku projektu realizowanego na Wawelu punktami nawiązania były stacje referencyjne ASG-EUPOS (Aktywna Sieć Geodezyjna EUPOS), które stanowią podstawową osnowę geodezyjną na terenie kraju [5]. Aby zapewnić najwyższą jakość sygnału w danym obszarze, wybrano najbliższe położone stacje ASG-EUPOS: Kraków (KRA1), Oświęcim (OSWM), Nowy Sącz (NWSC), Nowy Targ (NWT1), Proszowice (PROS) oraz Tarnów (TRNW).

Dodatkowo wykorzystano punkty szczegółowej osnowy miejskiej o numerach: 712511114620, 712511114880, 712511114900, 712511114870, 712511114160 oraz 712511115641, które przed pomiarami zostały zweryfikowane w terenie (rys. 1). Na wybranych punktach projektowanej osnowy, skąd możliwa była obserwacja wyniosłych obiektów, takich jak iglica Hejnalicy Kościoła Mariackiego, iglica na kopule Kościoła św. Piotra i Pawła, iglica na Wieży Zegarowej Katedry Wawelskiej oraz iglica na wieży telewizyjnej TVP Kraków na Krzemionkach, zaplanowano pomiar kątów. Obiekty te, należące do osnowy szczegółowej, pełnią funkcję punktów wzmacniających konstrukcję projektowanej sieci, co dodatkowo zwiększa jej stabilność.

5. LOKALIZACJA PUNKTÓW POMIAROWYCH

Zamek Królewski na Wawelu charakteryzuje się zwartą zabudową, co sprawia, że wybór lokalizacji punktów pomiarowych wymaga wyjątkowej staranności. Kluczowe było zapewnienie maksymalnej dokładności pomiarów, przy jednoczesnym zadbaniu o ochronę zabytków przed ewentualnymi uszkodzeniami [6]. Punkty pomiarowe zostały rozmieszczone tak, aby umożliwić rejestrację jak największej liczby obiektów topograficznych znajdujących się na terenie Zamku Królewskiego. Dbałość o te istotne kwestie pozwoliła zaprojektować optymalną sieć pomiarową, która zapewnia dokładność i wiarygodność pomiarów geodezyjnych.

Wysokie budowle oraz masywne mury otaczające wzgórze wawelskie stanowią istotne wyzwanie podczas pomiarów GNSS (*Global Navigation Satellite System*). Odpowiednio dobrana lokalizacja punktów pozwala na uzyskanie optymalnego czasu pomiaru oraz gwarantuje wysoką jakość wyników. Ograniczona widoczność horyzontu oraz odbicia sygnałów satelitarnych od zabudowy mają negatywny wpływ na wyznaczanie pozycji punktów osnowy geodezyjnej. Unikano zatem miejsc, gdzie mogłyby występować przeszkody, takie jak elementy zasłaniające horyzont i infrastruktura techniczna (linie energetyczne, trakcje tramwajowe), które mogłyby zakłócać proces pomiarowy.

6. STABILIZACJA PUNKTÓW OSNOWY GEODEZYJNEJ

Charakterystyczną cechą osnowy geodezyjnej jest wysoka trwałość, stąd odpowiednia stabilizacja punktów w terenie pełni kluczową rolę w procesie zakładania sieci geodezyjnej.

Ze względu na realizację projektu na Zamku Królewskim na Wawelu zdecydowano się na zastosowanie nietypowego sposobu stabilizacji punktów geodezyjnych. Do utrwalenia

punktów o numerach M2, M5, M6, M7, M15 i M17 (rys. 1) wykorzystano stylizowane medaliony, co stanowi pierwsze tego typu rozwiązanie w Polsce.

Medaliony zaprojektowane przez Mariusza Meusa, pracownika Zamku Królewskiego na Wawelu, odzwierciedlają symbolikę obiektów znajdujących się w ich najbliższym sąsiedztwie. Dzięki temu punkty geodezyjne pełnią zarówno funkcję geodezyjną, jak i edukacyjną. Takie rozwiązanie przyczynia się do poszerzenia wiedzy na temat znaczenia punktów geodezyjnych oraz geodezji.

Medalion wrót do Wawelu przedstawia Bramę Herbową (rys. 2), która powstała pod nadzorem kierownika prac restauracyjnych na Wawelu – Adolfa Szyszko-Bohusza. Był on także organizatorem kampanii z cegiełkami donacyjnymi [7], umieszczonymi w północnym murze fortecznym prowadzącym do bramy.



Rys. 2. Medalion nr 1
Projekt: Mariusz Meus

Medalion nr 2 przedstawia Katedrę Wawelską (rys. 3), która jest jedną z najważniejszych świątyń w Polsce. Choć należy do grona mniejszych katedr w kraju, wyróżnia się niezwykle bogatą historią. Jest miejscem spoczynku wielu królów oraz wybitnych postaci historycznych. Budowla składa się z 17 kaplic, spośród których najbardziej znana jest Kaplica Zygmuntowska. Najwyższym punktem Katedry jest wznosząca się na 70 metrów ponad wawelskie mury Wieża Zegarowa.



Rys. 3. Medalion nr 2
Projekt: Mariusz Meus

Medalion przedstawiony na rysunku 4 znajduje się w pobliżu wystawy „Wawel Zaginiony” i upamiętnia fundamenty i ruiny, które odkryto podczas badań archeologicznych. Zrekonstruowane fragmenty dawnych murów można odnaleźć w zieleńcu dziedzińca zewnętrznego, a brukowe oznaczenia na ścieżkach i placach wyznaczają przebieg historycznych fortyfikacji i bram.



Rys. 4. Medalion nr 3
Projekt: Mariusz Meus

Medalion numer 4 (rys. 5) symbolizuje związek między Wawelem a Giewontem, a dokładniej z krzyżem znajdującym się na tym szczycie. Te dwa miejsca łączy przebiegający przez nie ten sam południk. Jest to fakt mało znany. Dystans dzielący Wawel i Giewont wynosi dokładnie 89,298 km, a w bezchmurne dni z Wawelu można dostrzec sylwetkę górskiego szczytu.



Rys. 5. Medalion nr 4
Projekt: Mariusz Meus

Kolejny z medalionów (rys. 6) ukazuje Wawel jako potężną twierdzę – od wieków doskonale chronioną. Jego system obronny ewoluował od wałów ziemnych z palisadą, przez średnio-wieczne mury z wysokimi basztami, aż po osiemnastowieczne i dziewiętnastowieczne fortyfikacje o długości 1153 metrów i wysokości 15 metrów. Strategiczne położenie Wawelu, otoczonego zakolami Wisły i bagnami, czyniło go zarówno symbolem władzy, jak i kluczowym punktem obronnym.



Rys. 6. Medalion nr 5
Projekt: Mariusz Meus

Ostatni z medalionów (rys. 7) przedstawia Ogrody Królewskie, znajdujące się po wschodniej stronie Zamku, w sąsiedztwie murów obronnych. Odkrycie pozostałości dawnych ogrodów królewskich na górnym tarasie stało się podstawą do ich rekonstrukcji. Dzięki wieloletnim badaniom historycznym i archeologicznym przywrócono je do dawnej świetności, a od 2015 roku są dostępne dla zwiedzających.



Rys. 7. Medalion nr 6
Projekt: Mariusz Meus

Medaliony wykonano z brązu, który charakteryzuje się wysoką odpornością na korozję oraz ścieranie, co jest istotne w przypadku punktów usytuowanych w miejscach o dużym natężeniu ruchu. Centr punktu znajduje się 2 mm poniżej obrzeża medalionu (rys. 8). Zwiększa to trwałość i odporność na uszkodzenia mechaniczne. Wybór tego materiału oraz odpowiednia stylizacja sprawiają, że osnowa harmonijnie wpasowuje się w architekturę Zamku Królewskiego na Wawelu, tworząc spójną całość z historycznym charakterem obiektu.

Do pozostałych punktów w sieci geodezyjnej zastosowano klasyczną stabilizację w postaci gwoździ pomiarowych ze stali nierdzewnej. Dodatkowo uwzględniono również istniejące w terenie jednoznaczne elementy charakteryzujące się stabilnością.



Rys. 9. Odbiornik GNSS Topcon HiPer VR

Natomiast klasyczne pomiary kątowno-liniowe, wykonywane metodą trzech statywów, umożliwiają wyznaczenie położenia także w miejscach, gdzie horyzont jest zasłonięty, np. w gęstej zabudowie czy w bramach. Do ich wykonania użyto tachimetru Topcon OS-203 (rys. 10), osiągającego dokładność $3''$ dla kątów i $\pm(1,5 \text{ mm} + 2 \text{ mm/km})$ dla mierzonych odległości [9]. Połączenie tych technologii pozwoliło uzyskać wyniki zgodne z wymaganiami dokładnościowymi dotyczącymi szczegółowej osnowy geodezyjnej [4].



Rys. 10. Tachimetr Topcon OS-203

8. POMIAR

Pomiar statyczny to metoda zapewniająca najwyższą precyzję. Wymaga ona zastosowania co najmniej dwóch odbiorników, które mierzą w sposób synchroniczny. Instrumenty pozostają nieruchome przez cały czas trwania sesji, odbierając sygnał z co najmniej czterech satelitów. Czas trwania kampanii pomiarowej może wynosić od kilku minut do kilku dni – w zależności od topografii terenu [10]. Metoda ta wymaga zastosowania postprocessingu, który realizowany jest w programach obliczeniowych, umożliwiających obliczenie wektorów łączących mierzone punkty. Nawiązanie do osnowy geodezyjnej stanowią stacje referencyjne ASG-EUPOS, mające znane współrzędne. Pomiar statyczny GNSS jest jedną z podstawowych metod stosowanych współcześnie w geodezji. Precyzyjne pomiary są w przypadku tej metody wykonywane z wykorzystaniem nowoczesnej technologii satelitarnej.

Na pierwszym etapie wykonano pomiar statyczny punktu znajdującego się na Wieży Zegarowej Katedry na Wawelu, z użyciem dwóch odbiorników Topcon HiPer VR. Rozstawienie rusztowania na potrzeby renowacji wieży umożliwiło ustawienie sprzętu nad iglicą, stanowiącą punkt osnowy szczegółowej, oraz przeprowadzenie pomiarów. Drugi odbiornik został rozstawiony nad punktem znajdującym się na Bulwarze Czerwieńskim (ekscentrze), co umożliwiło późniejsze powiązanie wyników uzyskanych w tym pomiarze z wynikami kolejnych etapów, zapewniając spójność danych. Czas trwania pomiaru wyniósł 4 h, co pozwoliło uzyskać wysoką dokładność współrzędnych wyznaczonego punktu.

Na kolejnym etapie jako punkty mierzone statycznie wybrano wszystkie punkty stabilizowane stylizowanymi medalionami (M2, M5, M6, M7, M11, M15, M17) oraz punkt nr 4 (rys. 1). Lokalizacje punktów zaprojektowano w taki sposób, aby zasłonięcie horyzontu było jak najmniejsze [11]. Dzięki temu zapewniono optymalne warunki do odbioru sygnału satelitarnego oraz uzyskania maksymalnej dokładności pomiarów. Pomiar odbywał się w pięciu sesjach, z których każda trwała 2 h. W kolejnych sesjach pomiarowych występowały punkty obrotowe.

Trzeci etap prac polegał na przeprowadzeniu klasycznych pomiarów kątoowo-liniowych z zastosowaniem metody trzech statywów [12]. W trakcie pomiaru osnowy zastosowano dwie różne techniki: metodę pojedynczego kąta oraz metodę kierunkową [10]. Pomiary z wykorzystaniem tej metody wykonano w dwóch seriach na wszystkich punktach zaprojektowanej sieci. Takie podejście umożliwiło poprawę dokładności uzyskanych wyników, ich weryfikację, a także skuteczną eliminację błędów osiowych instrumentu oraz błędów przypadkowych.

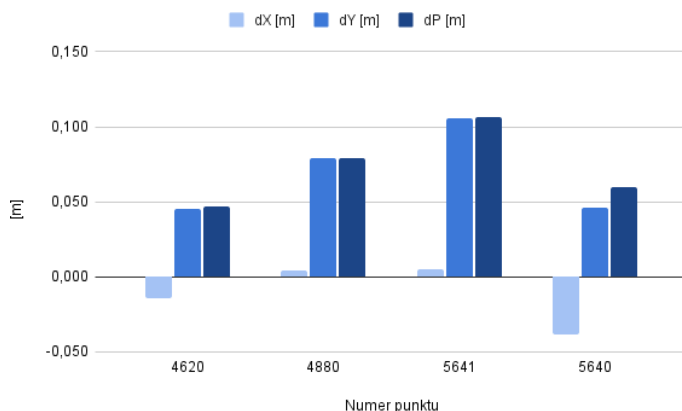
9. OBLICZENIE WSPÓŁRZĘDNYCH PUNKTÓW

Obliczenie współrzędnych punktów osnowy geodezyjnej jest kluczowym etapem procesu realizacji osnowy geodezyjnej, mającym na celu precyzyjne określenie ich położenia w przyjętym układzie odniesienia. W procesie wyrównania obserwacji obliczane są poprawki, które wynikają z błędów pomiaru, tak aby współrzędne punktów obliczone na ich podstawie były zgodne i spójne z układem odniesienia oraz przyjętym modelem wyrównania [13]. Punkty osnowy geodezyjnej pełnią funkcję nawiązania w przypadku wszelkich prac geodezyjnych, zapewniając zgodność i odpowiednią precyzję pomiarów terenowych [14].

W ramach przeprowadzonych prac wykonano wiele wariantów obliczeń współrzędnych punktów osnowy geodezyjnej, uwzględniając zarówno pomiary GNSS, jak i klasyczne metody pomiarowe. W zależności od wariantu do wyrównania pomiarów klasycznych wykorzystano sześć lub 14 punktów osnowy szczegółowej jako punkty nawiązania. Pozwoliło to na ocenę wpływu liczby punktów nawiązania na uzyskiwaną dokładność obliczonych współrzędnych. Zastosowanie różnych wariantów umożliwiło również analizę wyników w kontekście zastosowanych metod pomiarowych, a także porównanie dokładności współrzędnych uzyskanych za pomocą technik GNSS i klasycznych metod pomiarowych.

10. WYRÓWNANIE OBSERWACJI Z POMIARÓW STATYCZNYCH

Do wyrównania pomiarów statycznych wykorzystano obserwacje uzyskane z pięciu sesji pomiarowych, przeprowadzonych na 12 punktach, przy czym cztery punkty były punktami kontrolnymi. Zastosowanie sześciu stacji referencyjnych jako punktów nawiązania umożliwiło uzyskanie wysokiej dokładności obliczeń. W wyniku obliczenia wektorów i wyrównania ich w oprogramowaniu Topcon Tools uzyskano współrzędne punktów z minimalnymi błędami położenia ($1 \text{ mm} \leq m_p \leq 2 \text{ mm}$), co wskazuje na wysoką jakość danych wejściowych oraz właściwy dobór punktów nawiązania.



Rys. 11. Różnice między współrzędnymi katalogowymi a obliczonymi z pomiarów statycznych

Wykonanie pomiarów na punktach kontrolnych umożliwiło weryfikację jakości i precyzji przeprowadzonych pomiarów, a obliczenie odchyłek dP (1) na tych punktach pozwoliło na bieżąco monitorować stabilność istniejących punktów osnowy w terenie. Jak pokazano na rysunku 11, różnice dP na punktach kontrolnych potwierdziły spójność współrzędnych obliczonych z pomiarów statycznych z wartościami katalogowymi:

$$dP = \sqrt{dX^2 + dY^2} \quad (1)$$

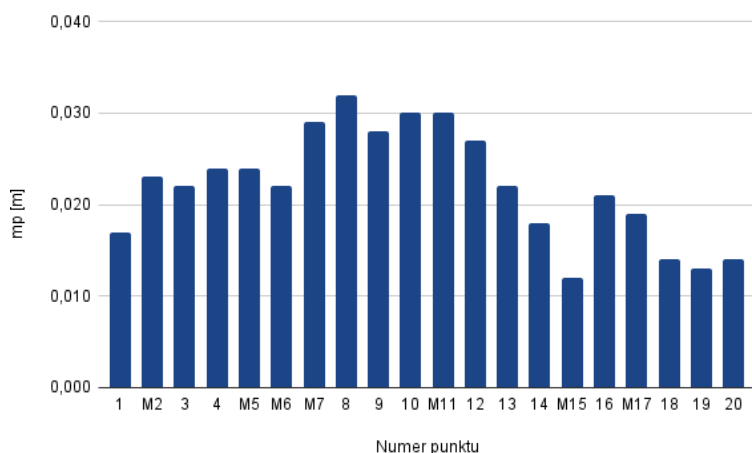
gdzie dX , dY – różnice między współrzędnymi katalogowymi a obliczonymi z pomiarów statycznych.

W tym wariancie wyrównania największa odchyłka wyniosła 10,6 cm na punkcie kontrolnym nr 5641 (rys. 11). Tak duża różnica może wynikać z faktu, że w latach 2012–2021, kiedy zakładano ten punkt osnowy szczegółowej, obowiązywało rozporządzenie [15], które dopuszczało błąd położenia punktu na poziomie 10 cm. Dodatkowo przyczyną może być lokalizacja punktu na skarpie Bulwaru Czerwieńskiego. Największa różnica występuje na współrzędnej Y, której oś jest prostopadła do kierunku biegu Wisły, co może sugerować wpływ osuwającej się skarpy na uzyskane wyniki analizy.

11. WYRÓWNANIE OBSERWACJI Z POMIARÓW KLASYCZNYCH

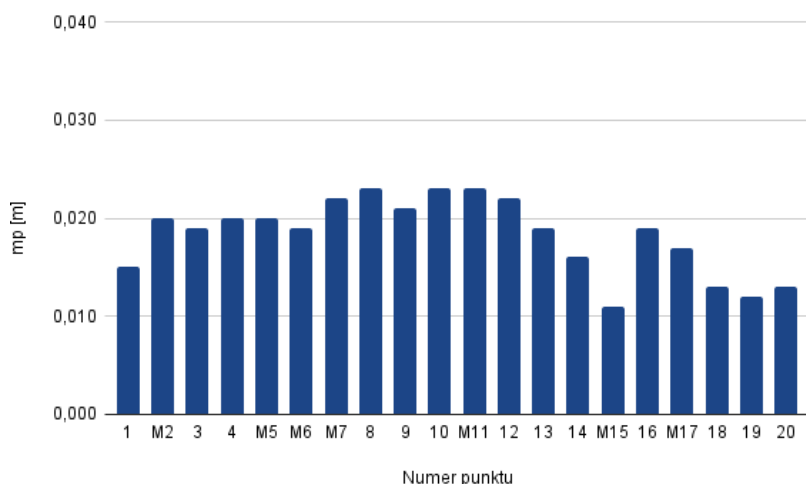
W kolejnych wariantach wyrównań wykorzystano obserwacje z pomiarów klasycznych, które wcześniej zostały odpowiednio opracowane. Oznacza to, że odległości skośne zostały zredukowane o kąt zenitalny oraz obliczono kąty poziome między punktami. W jednym z wariantów jako punkty nawiązania wykorzystano sześć punktów istniejącej osnowy szczegółowej naziemnej, natomiast w drugim wariancie dodano osiem dodatkowych punktów osnowy szczegółowej znajdujących się na obiektach wyniosłych (takich jak wieże kościołów czy wieża telewizyjna). Obliczenia przeprowadzono w oprogramowaniu C-GEO.

W pierwszym wariancie, w którym zastosowano sześć punktów osnowy szczegółowej naziemnej, największe błędy położenia punktów (m_p) występowały w środkowej części sieci, szczególnie na punktach najbardziej oddalonych od punktów nawiązania. Największe uzyskane m_p w tym wariancie wyniosło 0,032 m dla punktu nr 8, a dla punktów nr 10 i M11 osiągnęło wartość 0,030 m (rys. 12). Rozkład błędów w tym wariancie pokazuje, że dokładność wyznaczania współrzędnych jest bardziej zróżnicowana – często przekracza wartość 0,025 m. Oznacza to, że sieć w tym wariancie jest mniej stabilna. Wynika to z wykorzystania mniejszej liczby punktów nawiązania oraz nierównomiernego rozmieszczenia tych punktów, co negatywnie wpływa na geometrię sieci.



Rys. 12. Wartości błędu położenia dP punktu w wariancie z nawiązaniem do punktów osnowy szczegółowej naziemnej

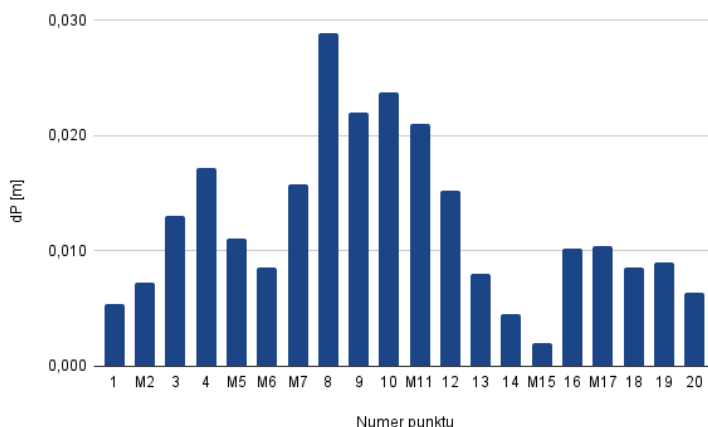
W drugim wariancie, dzięki uwzględnieniu dodatkowych ośmiu punktów osnowy szczegółowej znajdujących się na obiektach wyniosłych, poprawiła się dokładność wyrównania. Największy błąd położenia punktu wynosił 0,023 m, a wartości m_p w większości punktów były bardziej zbliżone do 0,020 m. Na wykresie (rys. 13) przedstawione wartości m_p są spójne, co świadczy o większej stabilności sieci w porównaniu z wariantem 1. Rozbudowa sieci o dodatkowe punkty nawiązania przyczyniła się do poprawy jej geometrii, co skutkowało redukcją błędów położenia punktów i zwiększeniem dokładności wyrównania.



Rys. 13. Wartości błędu położenia dP punktu w wariancie z nawiązaniem do punktów osnowy szczegółowej naziemnej i dodatkowymi punktami osnowy szczegółowej znajdującymi się na obiektach wyniosłych

Na rysunku 14 zostały przedstawione błędy położenia punktów wynikające z różnicy między wariantami (dP (1), gdzie dX i dY – różnice między współrzędnymi obliczonymi w różnych wariantach). Największe wartości występują w środkowej części wykresu, szczególnie w przypadku punktów 8-M11. W związku z tym można stwierdzić, że dodanie punktów osnowy szczegółowej na obiektach wysokich jako punktów nawiązania miało największy wpływ właśnie w tej części sieci, gdzie w wariancie 1 wystąpiły największe błędy. Dla pozostałych punktów wartości dP są znacznie mniejsze – oscylując w granicach 0,010–0,015 m. Prowadzi to do wniosku, że różnice między wariantami nie były tak znaczące na obrzeżach sieci. Rezultaty sugerują, że największy wpływ na poprawę dokładności miało dodanie punktów nawiązania w strategicznych lokalizacjach, czego efektem było uzyskanie podobnych błędów położenia punktów w wariancie 2.

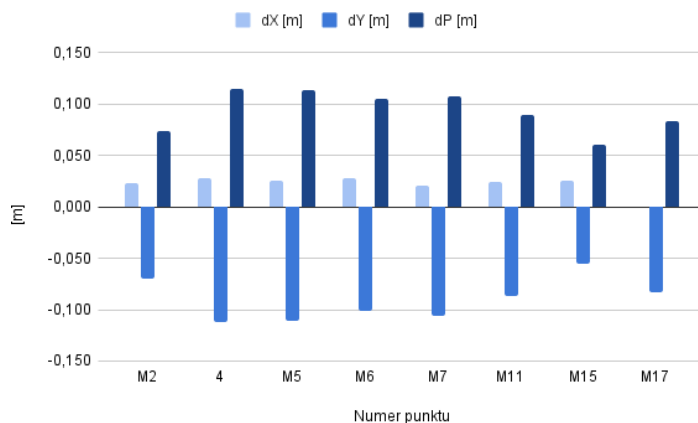
Reasumując, można dojść do wniosku, że drugi wariant, oparty na większej liczbie punktów nawiązania, okazał się korzystniejszy pod względem dokładności i stabilności sieci, co podkreśla istotność równomiernego rozmieszczenia punktów odniesienia w procesie wyrównania pomiarów geodezyjnych.



Rys. 14. Błąd położenia dP punktu wynikający z różnicy między wariantem z nawiązaniem do punktów osnowy szczegółowej naziemnej a wariantem z nawiązaniem do punktów osnowy szczegółowej naziemnej i dodatkowymi punktami osnowy szczegółowej znajdującymi się na obiektach wyniosłych

12. PORÓWNANIE WYNIKÓW POMIARÓW STATYCZNYCH GNSS Z POMIARAMI KLASYCZNYMI

Zastosowane techniki pomiarowe miały wpływ na końcową dokładność współrzędnych punktów osnowy geodezyjnej. Jednakże zarówno pomiary GNSS, jak i pomiary klasyczne dostarczyły wyników o wysokiej dokładności.



Rys. 15. Różnice w położeniu punktów pomierzonych metodą statyczną GNSS i metodą klasyczną

Na wykresie (rys. 15) przedstawiono różnicę dotyczącą współrzędnych punktów mierzonych obiema metodami oraz błąd położenia punktu. Wartości dX i dY pokazują, że różnice

w wynikach pomiarów statycznych i klasycznych są zauważalne. Największe różnice pojawiają się w przypadku współrzędnej Y, co może wynikać z wpływu przeszkód terenowych lub błędów systematycznych w jednej z metod. Dla większości punktów różnice te są stosunkowo stałe, co sugeruje, że jedna z metod mogła być bardziej podatna na błędy.

Podsumowując, można stwierdzić, że pomiary statyczne GNSS jak i pomiary klasyczne kątowno-liniowe dostarczyły spójnych wyników – jednak w niektórych miejscach wystąpiły systematyczne różnice, które powinny zostać uwzględnione w dalszej analizie.

13. WNIOSKI I PODSUMOWANIE

Przeprowadzone pomiary oraz wyniki obliczeń współrzędnych punktów osnowy geodezyjnej zostały porównane z założeniami teoretycznymi. W większości przypadków uzyskane wartości były zgodne z przewidywaniami, jednak wystąpiły drobne odchylenia wynikające z wpływu warunków terenowych oraz dokładności zastosowanych metod pomiarowych.

Na końcową dokładność wpłynęło kilka czynników, takich jak dostępność satelitów GNSS, zakłócenia sygnału spowodowane obecnością wysokich budynków oraz warunki atmosferyczne. Istotne znaczenie miała także dokładność instrumentów geodezyjnych oraz przyjęta metodyka wyrównania sieci. Pomiary klasyczne były zgodne z pomiarami statycznymi, a różnice między metodami utrzymywały się na stałym poziomie.

Podczas realizacji projektu napotkano trudności, w tym ograniczony dostęp do mierzonego terenu, co wymusiło modyfikację pierwotnych planów pomiarowych. Kolejnym wyzwaniem była konieczność integracji różnych metod pomiarowych. Wymagało to zastosowania odpowiednich procedur transformacyjnych i wyrównawczych.

Założona na wzgórzu wawelskim osnowa geodezyjna może znaleźć zastosowanie w inwentaryzacji i monitorowaniu budynków oraz precyzyjnym lokalizowaniu odkrywek archeologicznych. Opracowana metodologia może być również wykorzystana w innych zabytkowych miejscach, gdzie wymagane są precyzyjne dane geodezyjne do celów konserwatorskich i badawczych. Istnieje możliwość dalszego rozwijania osnowy na Wawelu dzięki włączeniu dodatkowych punktów, co zwiększyłoby jej stabilność i dokładność. Ponadto długoterminowa analiza przemieszczeń punktów mogłaby dostarczyć cennych danych na temat wpływu czynników środowiskowych na stan obiektów zabytkowych.

Przeprowadzone prace umożliwiły opracowanie osnowy geodezyjnej o wysokiej dokładności, spełniającej wymagane standardy pomiarowe i stanowiącej podstawę dalszych badań oraz analiz. Uzyskane wyniki potwierdziły skuteczność zastosowanych metod i jednocześnie pokazały, że istnieje konieczność uwzględnienia specyficznych czynników terenowych, które mogą wpływać na dokładność pomiarów.

LITERATURA

- [1] Jagielski A., *Geodezja II*, Wydawnictwo Geodpis, Kraków 2003.
- [2] Oniszczyk A., Misiuk Z., Makowska A., Wrzosek J., Sekuła M. (oprac.), *Standardy prowadzenia badań archeologicznych. Cz. 1. Badania nieinwazyjne lądowe*, Narodowy Instytut Dziedzictwa, Warszawa 2019, <https://nid.pl/wp-content/uploads/2021/12/Standardy-badan-archeologicznych-cz.-1-nieinwazyjne-ladowe.pdf> [dostęp: 24.02.2025].

- [3] Banasik P., Bujakowski K., Kolińska M., Michalik D., Nowak J., *Geodezyjne porządki w Krakowie. Konwersja zasobu geodezyjnego i kartograficznego miasta Krakowa do obowiązujących układów współrzędnych i wysokości. Cz. I*, Geodeta: magazyn geoinformacyjny, nr 1, 2012, s. 14–18.
- [4] *Rozporządzenie Ministra Rozwoju, Pracy i Technologii z dnia 6 lipca 2021 r. w sprawie osnów geodezyjnych, grawimetrycznych i magnetycznych*, Dz.U. 2021 poz. 1341.
- [5] ASG-EUPOS, <https://www.asgeupos.pl/>.
- [6] Petrovič D., Grigillo D., Kosmatin Fras M., Urbančič T., Kozmus Trajkovski K., *Geodetic methods for documenting and modelling cultural heritage objects*, International Journal of Architectural Heritage, vol. 15, 2021, <https://doi.org/10.1080/15583058.2019.1683779>.
- [7] *Cegielki Wawelskie*, Zamek Królewski na Wawelu, <https://wawel.krakow.pl/cegielki-wawelskie> [dostęp: 16.11.2024].
- [8] TPI Sp. z o.o., *Odbiornik GNSS Topcon HiPer VR*, <https://tpi.com.pl/produkt/topcon-hiper-vr> [dostęp: 19.08.2024].
- [9] TPI Sp. z o.o., *Tachimetr Topcon OS-200*, <https://tpi.com.pl/produkt/os-200> [dostęp: 19.08.2024].
- [10] Jagielski A., *Geodezja I*, Wydawnictwo Geodpis, Kraków 2005.
- [11] Banasik P., Królikowska K., *Problematyka dostępności sygnałów GNSS na obszarach miejskich*, Przegląd Geodezyjny, nr 1, 2016, s. 4–7, <http://dx.doi.org/10.15199/50.2016.1.2>.
- [12] Kuczyńska G., Stawska M., Walicka A., *Modern geodetic techniques in the monitoring of historic buildings*, [w:] *E3S Web of Conferences. XXII International Scientific Conference “Construction the Formation of Living Environment” (FORM-2019)*, vol. 97, 2019, https://www.e3s-conferences.org/articles/e3sconf/abs/2019/23/e3sconf_form2018_04043/e3sconf_form2018_04043.html [dostęp: 24.02.2025].
- [13] Osada E., *Geodezyjne układy odniesienia*, Wydawnictwo UxLan, Wrocław 2016.
- [14] Bielecka E., Pokonieczny K., Kamiński P., *Charakterystyka rozmieszczenia przestrzennego punktów poziomej osnowy szczegółowej*, Roczniki Geomatyki, Tom XIII, Zeszyt 3(69), 2015, s. 201–208.
- [15] *Rozporządzenie Ministra Administracji i Cyfryzacji z dnia 14 lutego 2012 r. w sprawie osnów geodezyjnych, grawimetrycznych i magnetycznych*, Dz.U. 2012 poz. 352.

Franciszek Michalski*

LEGO: PRZYGODA – KREATYWNY PLAGIAT CZY DEKONSTRUKCJA MESJANIZMU

Artykuł analizuje motyw mesjanizmu w filmach *Matrix* oraz *LEGO: Przygoda*, porównując narracyjne mechanizmy wykorzystywane do przedstawienia postaci „wybrańca”. Autor bada, czy *LEGO: Przygoda* stanowi kreatywny plagiat *Matrixa* czy raczej jego dekonstrukcję, dochodząc do wniosku, że film wpisuje się w nurt metamodernizmu, łącząc modernistyczną ideę wybrańca z postmodernistyczną ironią. Analiza obejmuje koncepcję mesjańskiej maszyny Łukasza Kołoczka oraz sposób, w jaki oba filmy operują konwencją przepowiedni i spełnienia przeznaczenia.

THE LEGO MOVIE – CREATIVE PLAGIARISM OR DECONSTRUCTION OF MESSIANISM

The article examines the motif of messianism in the films *The Matrix* and *The LEGO Movie*, comparing the narrative mechanisms used to present the character of the „chosen one”. The author examines whether *The LEGO Movie* is a creative plagiarism of *The Matrix* or rather its deconstruction, concluding that the film fits into the metamodernist trend, combining the modernist idea of the chosen one with postmodernist irony. The analysis includes Łukasz Kołoczek’s concept of the messianic machine and the way in which both films operate with the convention of prophecy and fulfillment of destiny.

1. MESJANIZM W KULTURZE WSPÓŁCZESNEJ

Historie przedstawiające figury zbawiciela są opowiadane od ponad dwóch tysięcy lat. Jedną z bardziej znanych i wpływowych jest ta o Jezusie z Nazaretu, Synu Bożym, który swoją męczeńską śmiercią zbawił ludzkość. W kulturze pojawiły się także inne przedstawienia zbawców, na przykład w okresie polskiego romantyzmu Adam Mickiewicz wykreował wizerunek „narodu polskiego jako mesjasza, cierpiącego dla zbawienia innych narodów” [1, s. 73]. Z czasem postać wybawcy zaczęto wykorzystywać w narracjach fantastycznych – Paul

* AGH Akademia Górniczo-Hutnicza, Wydział Humanistyczny, Filmoznawcze Koło Naukowe.

Atryda w *Mesjaszu Diuny* [2] czy Neo w *Matrixie* [3]. Pod koniec XX wieku przedstawienia mesjaszy uległy zmianie. Ich rolę zaczęły pełnić młodsze postacie, pojawiające się w narracjach adresowanych do dzieci i młodzieży. Radhiah Chowdhury określiła ich jako skazanych na zagładę – dzieci, takie jak Ender Wiggin z *Gry Endera* [4] czy Lyra Belacqua i Will Parry z *Mrocznych Materii* [5–7], tracące swoją niewinność, muszące zabijać i liczyć się z tym, że ich ofiara jest tylko częścią większego planu układanego przez dorosłych [8, s. 107–111]. Obraz ten zmieniła J.K. Rowling, przedstawiając historię Harry’ego Pottera, który ostatecznie odnajduje szczęście wśród rodziny i przyjaciół oraz podejmuje pracę umożliwiającą mu zmienianie magicznego świata na lepsze [9]. Jednak wraz ze zwiększającą się popularnością młodzieżowych narracji dystopijnych po 2010 roku powracają zakończenia, w których zwycięstwo nie jest całkowite lub wiąże się z jakimś poświęceniem, tak jak w przypadku *Kosogłosa* Suzanne Collins [10]. Dlatego wraz z pojawieniem się *LEGO: Przygody* [11] wykreowane zostaje nowe spojrzenie na mesjanizm, które jednocześnie czerpie z tradycji mesjanistycznych i z nowej formuły wypracowanej przez autorów powieści młodzieżowych.

Celem niniejszego artykułu jest sprawdzenie, w jaki sposób narracja przedstawiona w filmie *LEGO: Przygoda* w reżyserii Phila Lorda i Christophera Millera wpisuje się w kulturowe przedstawienia mesjanizmu. Przez porównanie z *Matrixem* w reżyserii Lili i Lany Wachowskich oraz przy użyciu pojęć sformułowanych przez Łukasza Kołoczka w artykule *Mesjańska maszyna – szkic teorii mesjanizmu* [12, s. 101–129] zostanie wskazane, że choć analizowane dzieła są zbliżone pod względem struktury narracyjnej, różni je podejście do kreacji postaci wybawiciela. Następnie, odwołując się do artykułu Sissela Undheima, autor niniejszego tekstu wprowadzi pojęcie metamodernizmu jako podstawy interpretacji wątku mesjańskiego *LEGO: Przygody* jako narracji nastawionej na wolność, indywidualność i wyjątkowość jednostki.

2. MATRIX I LEGO: PRZYGODA W MESJAŃSKIEJ MASZYNIE

Matrix i *LEGO: Przygodę* można wpisać w koncepcję nazwaną przez Łukasza Kołoczka „mesjańską maszyną” [12], maszyną rozumianą jako zestaw cech charakterystycznych dla każdej religii mesjanistycznej. Autor artykułu skoncentruje się na wybranych elementach tej struktury – tych, które są kluczowe i szczególnie wyróżniają się w obu filmach.

Najważniejszym aspektem funkcjonowania tej teorii jest figura mesjasza, którą obie narracje realizują. Zarówno Neo, jak i Emmet, główny bohater *LEGO: Przygody*, wpisują się w rolę przepowiedzianego wybawcy uciśnionych.

W *Matrixie* zbawca zostaje zapowiedziany przez Wyrocznie jako nowe wcielenie przywódcy rebelii. Ma wyróżniać się ponadludzkimi zdolnościami kontroli symulacji, co doprowadzi ludzkość do ostatecznego zwycięstwa nad maszynami. Pełna treść przepowiedni nie zostaje jednak ujawniona w filmie – Morfeusz przekazuje jej ogólny sens Neo w momencie, gdy uznaje, że wybraniec jest już gotowy poznać prawdę. W *LEGO: Przygodzie* przepowiednia zostaje wypowiedziana w całości przez Witruwiusza, odpowiednika Morfeusza, w otwierającej sekwencji filmu, jeszcze zanim w historii pojawia się Emmet, a jej treść obejmuje tak naprawdę większość plastikowych figurek:

Przybędzie do nas poranka pewnego
 wybraniec o twarzy koloru żółtego.
 On Kłoczek Oporu odnaleźć zdoła
 choć ziemią pokryty jest... dookoła.
 I wsparty armią, w której każdy to chwyt,
 stanie do walki ze złem, by zniszczyć Kroplej i ocalić świat.
 Tak zdobędzie chwałę i szacunek,
 i serce niewiasty, w której gustuje
 A wszystko to prawda, bo się rymuje¹.

Z podanych informacji można wnioskować, że to odnalezienie Klocka Oporu czyni jednostkę Wybrańcem, nie zaś jakiś wewnętrzny element, z którym bohater się rodzi lub jest związany losem, jak w przypadku przepowiedni o Harrym Potterze [13].

Kołozek, analizując strukturę mesjańskiej maszyny, opisuje tzw. przełącznik: spełniony/niespełniony. Odnosi się on do rozróżnienia pomiędzy wiarą w to, że mesjasz już raz się pojawił i wierni oczekują jego powrotu, a wiarą w zapowiedziane nadejście mesjasza, które dopiero ma się dokonać. Neo z *Matrixa* spełnia pierwsze założenie, gdyż wedle przepowiedni Wyroczni jest reinkarnacją pierwotnego przywódcy rebelii (The One), a jego powrót ma zapowiadać koniec wojny oraz ostateczne zwycięstwo ludzkości w konflikcie z maszynami. Z kolei Emmet wypełnia drugą wersję, czyli przepowiednię Witruwiusza, odnajdując jako pierwszy Kłoczek Oporu, co czyni go Wybrańcem, pogromcą Lorda Biznesa i wybawcą świata. Z dwóch bohaterów tylko Emmet podaje w wątpliwość słuszność przepowiedni – głównie ze względu na reakcje Architektów dowiadujących się, że nie jest jednym z nich, ponieważ nie jest w stanie myśleć kreatywnie (rys. 1).

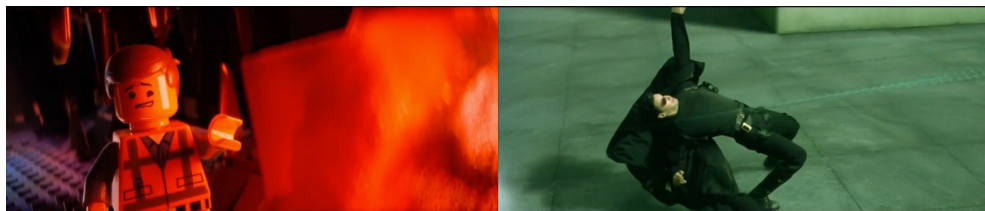


Rys. 1. Witruwiusz przepowiadający nadejście wybrańca; *Lego: Przygoda*, Phil Lord, Christopher Miller, 2014 (po lewej). Morfeusz tłumaczący Neo jego rolę w walce z agentami systemu; *The Matrix*, reż. Lana Wachowski, Lili Wachowski, 1999 (po prawej)

¹ Oryg.: „One day, a talented lass or fellow,
 a Special one with face of yellow,
 will make the Piece of Resistance found
 from its hiding refuge underground,
 and with a noble army at the helm,
 this Master Builder will thwart the Kragle and save the realm,
 and be the greatest, most interesting, most important person of all times.
 All this is true because it rhymes.”

Tłumaczenie Jakuba Kowalczyka jest jednocześnie na tyle dokładne, by zachować żółty kolor twarzy wybrańca i puentę całego żartu, czyli uzasadnienie działania przepowiedni przez jej rym, ale na tyle odchodzące od pierwowzoru, by zmienić jej całkowity wydźwięk. Wybraniec – w polskiej wersji językowej forma kobieca zostaje w pełni pominięta – nie jest już najlepszy, najbardziej interesujący ani najważniejszy z uwagi na sam fakt bycia wybrańcem, a raczej zyskuje szacunek i honor poprzez swoją walkę oraz ocalenie świata. Dodatkowo w wersji

Następnym elementem mesjańskiej maszyny jest efekt zasadniczy, czyli budowanie wiary w przyjście lub powrót wybrańca. W obu analizowanych filmach nie jest to przedstawione bezpośrednio, ponieważ akcja koncentruje się głównie na samym zbawcy. Pomimo to widoczne są wyraźne konsekwencje tej zbiorowej nadziei i wyczekiwania wśród uciśnionych. W *Matrixie* cała załoga Nabuchodonozora od dawna oczekuje na Wybrańca, który zgodnie z przepowiednią ma zniszczyć Matrixa i uwolnić ludzkość. Kiedy Neo pojawia się na ich statku, nie tylko Morfeusz i Trinity patrzą na niego z nadzieją, wierząc, że to właśnie on odmieni losy świata. Ekscytacja oraz przekonanie całej załogi o jego wyjątkowości stanowią klucz do dalszego budowania przez Neo relacji z załogą. Podobny moment pojawia się w *LEGO: Przygodzie*, kiedy Witruwiusz przedstawia Emmeta jako Wybrańca w Chmurokukulkuwie, które jest bazą rebeliantów. Reakcja Architektów jest pełna radości i poruszenia. Ich entuzjazm wzrasta jeszcze bardziej, gdy dowiadują się, że Kłoczek Oporu – symbol rewolucji – został odnaleziony i zostaje im zaprezentowany. Oczekiwanie na zbawiciela staje się tu źródłem nadziei oraz mobilizacji do ciągłej walki z opresyjnym systemem Biznesa (rys. 2).

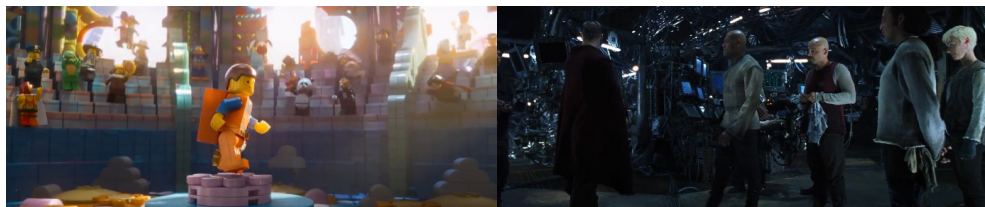


Rys. 2. Emmet przy pierwszym zetknięciu z Klockiem Oporu; *Lego: Przygoda*, Phil Lord, Christopher Miller, 2014 (po lewej). Neo po raz pierwszy używający swoich mocy w *Matrixie*; *The Matrix*, reż. Lana Wachowski, Lili Wachowski, 1999 (po prawej)

Kolejnym istotnym elementem mesjanizmu, obecnym w obu analizowanych filmach, jest przepracowanie ucisku, czyli sprecyzowanie, przed czym dokładnie mesjasz ma wybawić swój lud oraz w jaki sposób ma dokonać zbawienia. W *Matrixie* Neo ma ocalić ludzkość przed dominacją sztucznej inteligencji, jej terrorem oraz iluzją rzeczywistości, w której ludzie funkcjonują nieświadomie. Jego misją jest ostateczne zniszczenie Matrixa i przywrócenie ludziom wolności. W *Lego: Przygodzie* natomiast Wybraniec musi powstrzymać plan Lorda Biznesa, polegający na sklejeniu świata, a także uwolnić Architektów z więzienia, w którym ich myśli wykorzystywane są do tworzenia planów budowy miast. Ponadto Emmet ma pomóc mieszkańcom odnaleźć kreatywną wolność, zdejmując z nich jarzmo narzuconych instrukcji. Kluczowym elementem tej misji jest odnalezienie Klocka Oporu i użycie go we właściwym momencie. W obu przypadkach zbawiciel nie tylko uwalnia ludzi od opresji, ale także przynosi im nowe możliwości rozwoju i samostanowienia. Zło zostaje uosobione w podobny sposób: w postaci mężczyzn w garniturach, działających w ramach jakiegoś systemu, poruszających się raczej po czystych przestrzeniach biurowych, w przeciwieństwie do bohaterów, którzy muszą żyć w ukryciu, często w brudzie i chaosie² (rys. 3).

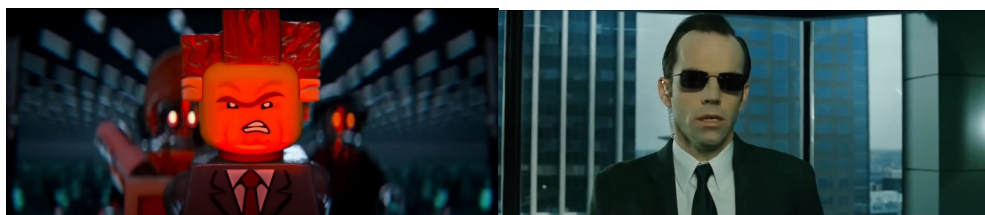
polskiej zostaje wycięty warunek mówiący o tym, że wybraniec musi być Architektem (*this Master Builder*), co sprawia, że Emmet jeszcze dokładniej wpisuje się w tę rolę, jako najbardziej przeciętna jednostka.

² Wyjątkiem może być Chmurokukulkuwo w *LEGO: Przygodzie*, jednak tamta przestrzeń ulega ostatecznie zniszczeniu przez siły Biznesa – statki zostają sklejone, żeby Architekci nie mogli ich niszczyć i przebudowywać, przez co odcina się im drogę ucieczki.



Rys. 3. Emmet na mównicy, obserwujący wiwatujących na wieść o odnalezieniu Klocka Oporu Architektów; *Lego: Przygoda*, Phil Lord, Christopher Miller, 2014 (po lewej). Neo stojący pośród załogi Nabuchodonozora po opuszczeniu Matrixa; *The Matrix*, reż. Lana Wachowski, Lili Wachowski, 1999 (po prawej)

Następne kilka aspektów celowo zostało pominiętych, ponieważ nie da się ich zastosować przy porównywaniu obu filmów³. Jednak można jeszcze zwrócić uwagę na przełącznik: religijny/sekularny, który Kołoczek rozumie jako dwa tryby działania maszyny – wymagający boskiej formy mesjasza i pomijający ją. Neo jako reinkarnacja tego, który przyszedł i ma powrócić, może być odczytywany jako alegoria Jezusa Chrystusa, zwłaszcza ze względu na jego nadludzkie umiejętności oraz możliwość kontrolowania symulacji na własną modłę⁴ [14]. W *Lego: Przygodzie* wygląda to zupełnie inaczej. Tamtejsza przepowiednia nie niesie za sobą piętna boskości – Emmet zdecydowanie nie jest traktowany jako istota ponadludzka, a jego zdolności ostatecznie nie różnią się tak bardzo od tych, które posiada każdy inny Architekt. Co prawda jest on w stanie przekształcać otaczającą go rzeczywistość zależnie od własnych potrzeb, ale ostatecznie jest w stanie robić to każdy, kto zda sobie sprawę, że z klocków można budować nie tylko zgodnie z instrukcjami (rys. 4).

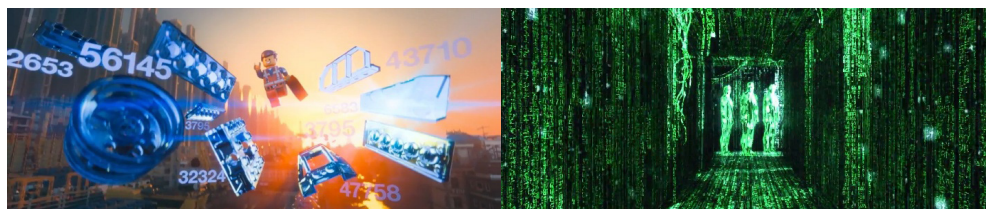


Rys. 4. Prezes Biznes w drodze na spotkanie ze Złym Gliną; *Lego: Przygoda*, Phil Lord, Christopher Miller, 2014 (po lewej). Agent Smith opowiadający Morfeuszowi o pierwszej wersji Matrixa; *The Matrix*, reż. Lana Wachowski, Lili Wachowski, 1999 (po prawej)

Podobieństwa w obu narracjach są na tym etapie widoczne. Pewne elementy mesjanistycznej maszyny pokrywają się, inne zaś celowo są rozbieżne, ale główna oś fabuły pozostaje w obu przypadkach taka sama: wybraniec zostaje odnaleziony, poświęca swoje życie, by chronić innych i wraca obdarzony nowymi mocami zaginania rzeczywistości (rys. 5).

³ Są to przełączniki: „konserwatywny/rewolucyjny”; „historyczny/eschatologiczny”; „anarchizm/absolutyzm”; „uniwersalny/partykularny”; oraz efekty: podział wspólnoty i produkcja przyszłości.

⁴ Uwagę zwraca na to Debra McCaw w swoim eseju *M&M: The Messiah and The Matrix*, gdzie nie tylko porównuje Neo do Chrystusa, ale też Matrix do Szatana, a agentów do demonów.



Rys. 5. Emmet zaczyna postrzegać świat jako poszczególne klocki, z których może zbudować, co zechce; *Lego: Przygoda*, reż. Phil Lord, Christopher Miller, 2014 (po lewej).

Neo zaczyna postrzegać wirtualny świat jako linijki kodu, które może kontrolować, aby zmieniać rzeczywistość; *The Matrix*, reż. Lana Wachowski, Lili Wachowski, 1999 (po prawej)

3. CZY TO PLAGIAT?

Daniele Colistra w jednym ze swoich artykułów definiuje plagiat jako „przywłaszczenie cudzego pomysłu” [15, s. 109]. W kontekście filmu oznacza to zastosowanie pewnych elementów cudzej pracy we własnej, najczęściej z nastawieniem, że widz nie rozpozna we wtórnym dziele pierwowzoru. Mogą to być podobne ujęcia, zabiegi fabularne dialogi lub postacie. Autorka zwraca też uwagę, że plagiat w kinematografii ciężko jest rozpoznać ze względu na inspirację poprzednimi dziełami, świadomą lub nie. Skoro więc da się zauważyć tak wyraźne podobieństwa między *Matrixem* i *LEGO: Przygodą*, to czy mamy do czynienia z plagiatem?

Phil Lord, reżyser *LEGO: Przygody*, w jednym z wywiadów zaznaczył, że nie chciał, aby Emmet był nowym Neo, lecz przeciętnym pracownikiem budowy [16, min 5:10–5:27]. Skoro jako widzowie dostrzegamy te podobieństwa i zauważamy wyraźne połączenia między obiema narracjami, a celem twórców *LEGO: Przygody* nie było przywłaszczenie sobie koncepcji siostr Wachowskich, to jak inaczej możemy nazwać zjawisko, które obserwujemy?

W odpowiedzi na to pytanie pomocny może okazać się ten sam artykuł Colistry. Opisano w nim trybut, czyli zabieg niewiele różniący się od plagiatu, polegający na wykorzystywaniu tych samych metod co inna produkcja, jednak mający w osobie oglądającej wytworzyć połączenie z pierwowzorem [15, s. 106]. Właśnie to dzieje się w przypadku *LEGO: Przygody* – wykorzystano tam motyw⁵, archetypy postaci⁶ i zabiegi narracyjne⁷ z *Matrixa* w celu opowiedzenia innej, nowej historii, budującej nowe znaczenia i przesłania dla odbiorcy.

Według powyższych kryteriów omawiana produkcja nie jest plagiatem, w następnym kroku przejdę więc do rozwinięcia ostatniej części tytułu.

Czy to dekonstrukcja?

Próżno szukać definicji dekonstrukcji ze względu na jej postmodernistyczną naturę, jednak aby mieć pole odniesienia, przytoczę tutaj fragment wypowiedzi Hélène Cixous, który całkiem zgrabnie oddaje główną myśl:

⁵ Na przykład motyw mesjanizmu – Neo/Emmet.

⁶ Na przykład archetyp mędrca i nauczyciela wybrańca – Morfeusz/Witruwiusz.

⁷ Na przykład konieczność przedarcia się przez wieżowiec pełen wrogów po stracie części sojuszników.

Dekonstrukcja to inaczej: ruch czytania zamrożonej rzeczywistości: zamkniętej politycznej, etycznej i filozoficznej rzeczywistości, jak mówi Derrida, opartej na opozycjach i fiksacjach. Gest Derridy jest gestem wprowadzenia jej w ruch, otwarcia; jedynym gestem, który pozwala iść w stronę prawdy, która nie istnieje. Prawda jest w ruchu, w różnicach. Oto jedyna myśl, która pozwala nie kłamać [*mentir*], a nieustannie zaprzeczać [*démentir*] [17, s. 127].

Chodzi więc przede wszystkim o to, by przyjrzeć się pewnym ideom uważniej – zbadać ich funkcjonowanie w praktyce w celu dotarcia do prawdy. Można porównać ideę do marmurowego posągu, a akt dekonstrukcji do dokładnego oglądania tego posągu w poszukiwaniu pęknięć – czyli wewnętrznych sprzeczności, nieciągłości lub niedopatrzeń autorów.

W filmie *LEGO: Przygoda* figura mesjasza została wykreowana zgodnie z działaniem maszyny opisanym przez Kołoczka, nie krytykując jej na żadnym etapie. Nadal jest to historia o bohaterze przezwyciężającym trudności losu i blokady wewnętrzne – w tym przypadku brak wiary w siebie – aby uratować świat. Jednocześnie ma podobną do *Matrixa* główną trójkę bohaterów⁸, kreację reprezentacji wroga i większość zamysłu fabularnego. Pojawić się może założenie, że *LEGO: Przygoda* stara się dekonstruować film sióstr Wachowskich przez imitację podobieństwa i diametralne zmiany – Emmet wpada na Lucy przypadkowo, Witruwiusza nie udaje się uratować z rąk Lorda Biznesa, a ostateczna konfrontacja ze złem kończy się pojednaniem, jednak tak naprawdę przerysowanie bohaterów i wątków dobrze znanych z *Matrixa* ma na celu bardziej zabawę konwencją niż krytykę schematów fabularnych.

Z kolei w kontekście mesjanizmu ważne jest to, że na chwilę przed poświęceniem swojego życia Emmet dowiaduje się, że przepowiednia, w którą uwierzył i dzięki której nabrał wiary w siebie, została zmyślona przez Witruwiusza. Tak naprawdę nie ma żadnego Wybrańca, bo może nim zostać każdy, kto uwierzy, że nim jest. Nie stanowi to krytyki mesjanizmu, lecz wpisuje się w metamodernistyczną strategię narracyjną, którą w swoim artykule opisuje Sissel Undheim:

Jako reakcja na cynizm i sarkazm postmodernizmu, metamodernizm wywołuje niektóre z tych samych reakcji napięć ontologicznych [...]. Zabawny, humorystyczny, ale nigdy złośliwy miks nieokreślonych, swobodnie unoszących się odniesień religijnych, które już są częścią popkulturowego, zglobalizowanego repertuaru, umożliwia zrównoważenie tego napięcia między satyrą a szczerością⁹ [18, s. 113].

Na potrzeby niniejszego artykułu metamodernizm można określić jako podejście łączące modernistyczne elementy, takie jak przepowiednia, Wybrańiec i jego zbawcze zdolności – z postmodernistycznym cynizmem, ironią i dekonstrukcją porządku w celu stworzenia nowej jakości, sytuującej się pomiędzy tymi dwoma paradygmatami. W przypadku *LEGO: Przygody* tym „nowym” jest opowieść, w której główny bohater – świadomy, że przepowiednia jest fałszywa i nie czyni go Wybrańcem, mimo to ją realizuje. Robi to ze względu na swoją decyzyjność i rozwój, a nie przez odgórne przeznaczenie czy los. Dzięki temu powstaje opowieść, której głównym przekazem jest wiara w siebie, pochwała indywidualizmu i twórczej kreatywności.

⁸ Wybrańiec – Neo i Emmet; Kobieta u jego boku – Trinity i Lucy; Mentor – Morfeusz i Witruwiusz.

⁹ Tłumaczenie własne. Oryg.: „As a reaction against the postmodernism’s cynicism and sarcasm, metamodernism evokes some of the same reactions of the ontological tensions [...]. The playful, humoristic, but never mean-spirited mash-up of non-specified, free-floating religious references that already are part of a pop-cultural, globalized repertoire make it possible to balance this tension between satire and sincerity.”

Zakończenie *LEGO: Przygody* wyróżnia się na tle innych historii o wybrańcach. Nie jest ono baśniowo-pozytywne jak w opowieści o Harrym Potterze ani tak pesymistyczne jak w przypadku losów Endera Wiggina. Zamiast tego przekaz, skierowany do młodego odbiorcy, ma przede wszystkim nieść nadzieję i motywować do samodzielnego kształtowania własnego losu.

4. PODSUMOWANIE

LEGO: Przygoda i *Matrix* bez wątpienia wykazują pewne cechy wspólne. W obu przypadkach mamy do czynienia z historią młodego, żyjącego samotnie mężczyzny, który zostaje wyrwany ze swojej rzeczywistości, aby walczyć o wolność świata. Obie narracje przejawiają podobne podejście do figury Wybrańca, jego kluczowej roli w opowieści i relacji z otaczającymi postaciami. Wykorzystują także zbliżone zabiegi stylistyczne, co ukazano przez zestawienie wybranych kadrów obu produkcji. Nie oznacza to jednak, że w procesie kreatywnym doszło do plagiatu, ani że film Phila Lorda i Christophera Millera stanowi krytykę lub próbę obnażenia słabości sposobu, w jaki siostry Wachowskie ujęły motyw mesjanizmu w *Matrixie*. Przeciwnie: *LEGO: Przygoda* tworzy nową jakość i formułę opowiadania o zbawcy. Różnice pojawiają się przede wszystkim w przedstawieniu samej przepowiedni, jej roli i podejścia postaci do celu walki. Jest to więc inna, metamodernistyczna historia, w której protagonista sam decyduje się zostać Wybrańcem (The Special), pomimo że jest równie wyjątkowy, co każdy dookoła niego. W ten sposób film wpisuje się w przesłanie, zgodnie z którym każdy może „składać swoje klocki tak, jak chce”.

LITERATURA

- [1] Litka P., Kowalik Ł., *Polski mesjanizm romantyczny*, Przegląd Filozoficzny – Nowa Seria, R. 27, nr 1(105), 2018, s. 67–91.
- [2] Herbert F., *Dune Messiah*, Putnam Publishing, New York 1969.
- [3] Wachowska L., Wachowska L. (reż.), *Matrix*, Warner Bros. Pictures, 1999.
- [4] Card O.S., *Ender's Game*, Orbis, London 1999.
- [5] Pullman P., *The Northern Lights*, Scholastic, London 1995.
- [6] Pullman P., *The Subtle Knife*, Scholastic, London 1997.
- [7] Pullman P., *The Amber Spyglass*, Scholastic, London 1999.
- [8] Chowdhury R., *A Chosen Sacrifice: The Doomed Destiny of the Child Messiah in Late Twentieth-Century Children's Fantasy*, Papers: Explorations into Children's Literature, vol. 16, no. 2, 2006, s. 107–111, <https://ojs.deakin.edu.au/index.php/pecl/article/view/1224> [dostęp: 16.03.2025].
- [9] Rowling J.K., *Harry Potter i insygnia śmierci*, przeł. Polkowski A., Media Rodzina, Poznań 2008.
- [10] Collins S., *Mockingjay*, Scholastic, London 2010.
- [11] Lord P., Miller C. (reż.), *The LEGO Movie/Lego: Przygoda*, przeł. Kowalczyk J., Warner Bros. Pictures, 2014.

- [12] Kołoczek Ł., *Mesjańska maszyna – szkic teorii mesjanizmu*, Logos i Ethos, t. 24, nr 1, 2018, <https://doi.org/10.15633/lie.2553>.
- [13] Rowling J.K., *Harry Potter i Zakon Feniksa*, przeł. Polkowski A., Media Rodzina, Poznań 2004.
- [14] McCaw D., *M&M: The Messiah and The Marix*, <https://www.matrixfans.net/symbolism-philosophy-and-allegory/mm-the-messiah-and-the-matrix/> [dostęp: 20.03.2025].
- [15] Colistra D., *Citation, Tribute, Remake, Plagiarism. Overlaps and Borders in Movies*, *Img Journal*, vol. 3, no. 4, 2021, pp. 96–115, <https://doi.org/10.6092/issn.2724-2463/12662>.
- [16] Rotten Tomatoes Coming Soon, *The Lego Movie Interview – Phil Lord & Christopher Miller (2014) – Animated Movie HD*, <https://www.youtube.com/watch?v=gww-StIt61bs> [dostęp: 25.02.2025].
- [17] Burzyńska A., *Dekonstrukcja, polityka i performatyka*, Universitas, Kraków 2013.
- [18] Undheim S., *Made Up Prophecies: Metamodern Play with Religion, Spirituality and Monomyth in the LEGO Universe*, [w:] Hains R., Mazzarella S.R. (red.), *Cultural Studies of LEGO: More Than Just Bricks*, Pelgrave, Salem 2019, s. 97–121.

Kajetan Nowak*

KONIEC WALKI Z WIATRAKAMI? ANALIZA WPŁYWU PROPONOWANEJ NOWELIZACJI PRAWA NA POWIERZCHNIĘ DOSTĘPNĄ DLA TURBIN WIATROWYCH

Aktualnie obowiązujące w Polsce prawo nakłada szereg ograniczeń odległościowych dotyczących budowania elektrowni wiatrowych. Artykuł zawiera autorską analizę zmiany potencjalnej powierzchni dostępnej pod budowę elektrowni wiatrowych na lądzie w świetle nowelizacji prawa. W *Rzadowym projekcie ustawy o zmianie ustawy o inwestycjach w zakresie elektrowni wiatrowych oraz niektórych innych ustaw* (nr projektu UD89) z drugiej połowy 2024 roku minimalna odległość turbin wiatrowych od budynków mieszkalnych została ustalona na 500 m. W nowelizacji znalazł się również zapis zwiększający do 500 m bufor ochronny od siedlisk nietoperzy oraz ptasich obszarów Natura 2000. Oficjalne uzasadnienie projektu nie uwzględnia wpływu zmiany ograniczeń środowiskowych na powierzchnię dostępną dla turbin wiatrowych. Według metodologii przyjętej w artykule dopuszczalny obszar zwiększy się aż o 74%. Obliczenia przeprowadzono na podstawie danych z Geoportalu (BDOT10k) oraz PSEW za pomocą bibliotek GeoPandas oraz GLAES. Projekt ustawy nr UD89 pozytywnie wpływa na perspektywy krajowej energetyki wiatrowej. Niniejsza analiza jest pierwszym w Polsce oszacowaniem wpływu wspomnianych dodatkowych zapisów na potencjalną powierzchnię elektrowni wiatrowych.

FINAL TILTING OF WIND FARMS? HOW PROPOSED AMENDMENTS OF THE LAW AFFECT THE POTENTIAL AREA OF WIND FARMS

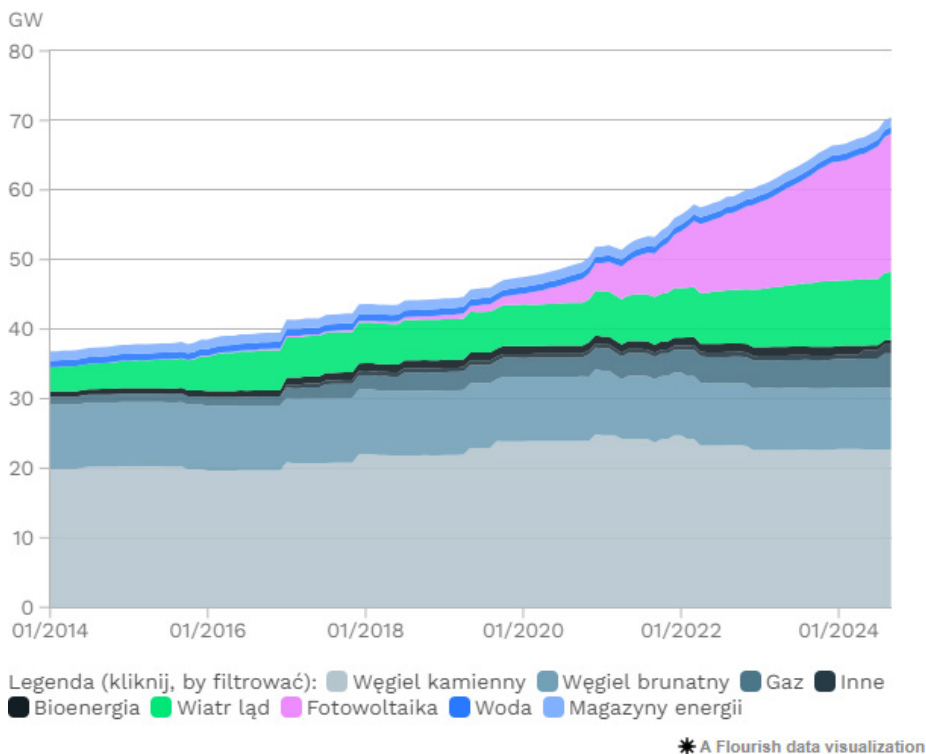
The current law in Poland imposes a series of distance restrictions on the construction of wind farms. This article contains an original analysis of the change in the potential area available for the construction of onshore wind farms in light of the legal amendments. In the *Government's draft law amending the law on investments in wind farms and certain other laws* (project number UD89) from the second half of 2024, the minimum distance of wind turbines from residential buildings was set at 500 meters. The amendment also includes a provision increasing the protective buffer to 500 meters from bat habitats and bird areas of Natura 2000. The official justification of the project does not take into account the impact of changes in environmental restrictions on the area available for wind turbines. According to the methodology adopted in the article, the permissible area will increase by as much as 74%. The calculations were carried out based on data from the Geoportal (BDOT10k) and PSEW using the GeoPandas and GLAES libraries. The UD89 draft law positively influences the prospects of national wind energy. This analysis is the first in Poland to estimate the impact of the aforementioned additional provisions on the potential area of wind farms.

* AGH Akademia Górniczo-Hutnicza, Wydział Energetyki i Paliw, Koło Naukowe Nova Energia, Fundacja Instrat.

1. WSTĘP

Przeciwdziałanie antropogenicznej zmianie klimatu wiąże się z szeregiem wyzwań, spośród których jednym z kluczowych jest dekarbonizacja sektora energii [1]. Odpowiedzią na to wyzwanie jest transformacja energetyczna [1], która obecnie dotyczy również Polski. Między 2019 a 2024 rokiem udział węgla w generacji energii elektrycznej zmniejszył się z 78% do 55% przy zbliżonym wolumenie całkowitej produkcji [2].

Przyłączanie odnawialnych źródeł energii jest jednym z najszybszych sposobów zmniejszenia emisyjności gazów cieplarnianych [1]. Według danych Agencji Rynku Energii (rys. 1) za grudzień 2024 roku do polskiej sieci elektroenergetycznej przyłączonych jest około 21 GW mocy w fotowoltaice, z czego 93% wykonano w latach 2020–2024 [3]. Ta nagła zmiana wynika m.in. ze sprzyjającego środowiska prawnego, mechanizmów wsparcia oraz czynników rynkowych. W Polsce energetyka wiatrowa nie była w ostatnich latach tak często wybieranym rozwiązaniem, jak energetyka słoneczna – po 2019 roku podłączono 4,2 GW, co stanowi 42% mocy wiatrowych [3].



Opracowanie własne energy.instrat.pl • Dane: ARE (Agencja Rynku Energii) za MKiŚ, URE

Rys. 1. Moce zainstalowane w polskim systemie elektroenergetycznym w GW, na podstawie danych ARE

Źródło: [3]

Od maja 2016 do kwietnia 2023 roku w Polsce obowiązywało prawo, znane w debacie publicznej jako „ustawa 10H”, które zabraniało instalacji nowych turbin wiatrowych w odległości bliższej niż dziesięciokrotność ich wysokości od budynków mieszkalnych [4]. W praktyce regulacje te znacząco ograniczyły budowanie kolejnych lądowych elektrowni wiatrowych niemal w całej Polsce. W okresie obowiązywania tzw. ustawy 10H przyłączono 3,3 GW (0,47 GW rocznie), w większości w ramach projektów rozpoczętych przed wejściem w życie przepisów.

Od kwietnia 2023 roku – pod warunkiem, że jest to zgodne z miejscowym planem zagospodarowania przestrzennego (MPZP) – minimalnym dystansem dla turbin wiatrowych jest 700 m od domów [5]. Jest to zapis o tyle kontrowersyjny, że został wprowadzony odrębnie podczas prac sejmowych. We wcześniejszym procesie konsultacji społecznych zaakceptowano odległość 500 m. Od daty przyjęcia częściowej liberalizacji do końca 2024 roku zainstalowano 1,4 GW nowych mocy (0,83 GW rocznie) [3].

25 września 2024 roku przedstawiono kolejną nowelizację pod nazwą *Projekt ustawy o zmianie ustawy o inwestycjach w zakresie elektrowni wiatrowych oraz niektórych innych ustaw*, oznaczoną kodem UD89 [6]. Zakłada ona zmianę minimalnej odległości od budynków mieszkalnych na 500 m niezależnie od MPZP. Dodatkowo wprowadzono w niej obostrzenia określające minimalną odległość od ptasich obszarów Natura 2000 oraz siedlisk nietoperzy wynoszącą również 500 m. Uzasadnienie projektu ustawy nie zawiera danych o wpływie nowych obostrzeń środowiskowych na powierzchnię dostępną dla elektrowni wiatrowych. Niniejsza analiza i towarzyszący jej artykuł na stronie Fundacji Instrat [7] zawierają najwcześniejsze oszacowanie wpływu dodatkowych zapisów. Pierwsza wersja analizy została opublikowana w ciągu trzech tygodni od ogłoszenia zapisów projektu ustawy nr UD89.

2. ZAŁOŻENIA ODLEGŁOŚCI TURBIN OD OBIEKTÓW

W analizie porównano trzy warianty buforów odległości od turbin wiatrowych.

1. Wariant bazowy (W0) opisuje założenia wynikające z prawa obowiązującego od kwietnia 2023 roku [5]. Minimalna odległość turbin wiatrowych od budynków mieszkalnych wynosi 700 m.
2. Wariant 1 (W1) opiera się na ogłoszonej we wrześniu 2024 roku nowelizacji ustawy nr UD89 [7]. Najmniejszy dystans od budynków mieszkalnych to 500 m. Wprowadzono dodatkowy, 500-metrowy bufor odległości od ptasich obszarów Natura 2000 oraz siedlisk nietoperzy.
3. Wariant 2 (W2) to zmodyfikowany wariant W1 bez dodatkowej ochrony obszarów ptasich i siedlisk nietoperzy.

Warianty zawierają także wspólne wykluczenia niewynikające wprost z treści ustawy wiatrakowej. Uwzględniają one ograniczenia techniczne, praktyki budowlane oraz wykluczenia pochodzące z innych analiz [8–10] i pozostają niezmiennie dla wszystkich wariantów. Założenia szczegółowo opisuje tabela 1.

Tabela 1. Porównanie odległości od obiektów dla badanych wariantów wykluczeń

Kategoria obiektów	Obiekty	Odległość [m] (W0/W1/W2)
Zabudowa	budynki mieszkalne	700/500/500
Zabudowa	pozostała zabudowa	0
Przyroda	parki narodowe	2500/1500/1500
Przyroda	rezerваты	500
Przyroda	parki krajobrazowe	500
Przyroda	lasы	200
Przyroda	obszary Natura 2000	0
Przyroda	ptasie obszary Natura 2000 oraz siedliska nietoperzy	0/0/500
Przyroda	rzeki i wody śródlądowe	0
Infrastruktura	lotniska	5100
Infrastruktura	istniejące turbiny wiatrowe	600
Infrastruktura	linie wysokiego napięcia	500
Infrastruktura	autostrady, drogi ekspresowe, drogi główne, linie kolejowe	200
Infrastruktura	pozostałe drogi, poligony wojskowe, kompleksy komunikacyjne oraz gospodarczo-przemysłowe	0

Uzyskane wyniki przedstawiają potencjał teoretyczny, który – ze względu na czynniki wychodzące poza zakres badania – może obejmować grunty w rzeczywistości nienadające się do wykorzystania pod budowę turbin wiatrowych. W kolejnych badaniach warto uwzględnić takie aspekty, jak wietrzność, akceptacja społeczna oraz stan prawny poszczególnych gruntów wskazanych jako potencjalnie dostępne dla rozwoju energetyki wiatrowej.

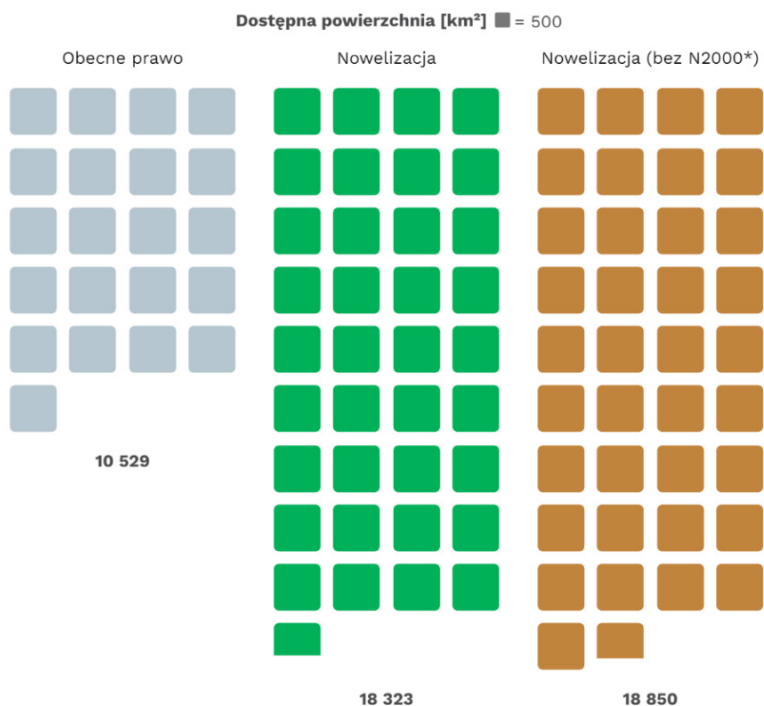
3. REZULTATY ANALIZY DOSTĘPNEJ POTENCJALNIE POWIERZCHNI DLA TURBIN WIATROWYCH

Przyjęcie nowelizacji ustawy UD89 zwiększy powierzchnię dostępną dla turbin wiatrowych w Polsce o 74%, czyli z 10 529 km² do 18 323 km². Ta znacząca zmiana w potencjałach jest spowodowana przede wszystkim różnicą 200 m w odległościach turbin od budynków mieszkalnych. Zmiana bufora od granic parków narodowych nie jest aż tak istotna – ich granice są zwarte, a także często otoczone lasami, które są w tej analizie wykluczone z potencjalnych gruntów pod energetykę wiatrową. W wariantcie nowelizacji (W1) 5,86% powierzchni

administracyjnej Polski jest dostępne do powstania energetyki wiatrowej, co jest znaczącym wzrostem w porównaniu z 3,37% wariantu bazowego (W0). Rezygnacja z dodatkowych ograniczeń środowiskowych w W2 ma stosunkowo niewielki wpływ na wynik, bo oznacza zwiększenie jedynie do 6,03% powierzchni administracyjnej Polski (18 850 km²). Oznacza to wzrost względem W1 o zaledwie około 2,8% (o 527 km², czyli o 0,17% powierzchni administracyjnej kraju). Wizualizacja zmian przedstawiona jest na rysunku 2.

Czy ptaki wypierają wiatraki?

Nie! Uwzględnienie ochrony siedlisk ptaków i nietoperzy zmniejsza dostępną powierzchnię tylko o ok. 2,8%.



Źródło: Opracowanie własne Instrat na podstawie BDOT10k oraz PSEW. Stan prawny na 10/2024.

*Bez uwzględnienia buforu 500 m od ptasich obszarów Natura 2000 oraz siedlisk nietoperzy



Rys. 2. Wizualizacja różnic pomiędzy wariantami w powierzchni potencjalnie dostępnej dla energetyki wiatrowej w Polsce

Źródło: [7]

Zmiany potencjalnej powierzchni różnią się znacząco w zależności od województwa. Największe, niemal trzykrotne, wzrosty potencjału pomiędzy wariantem bazowym (W0) a proponowaną nowelizacją (W1) dotyczą województwa kujawsko-pomorskiego oraz świętokrzyskiego. Potencjał tych województw jest obecnie niski, więc możliwość wzrostu jest znacząca. Jednak nawet po zmianach dostępna w nich powierzchnia nie przekroczy 5% powierzchni województwa.

Dokładne wartości potencjałów w kilometrach kwadratowych oraz informacje o względnym wzroście powierzchni po nowelizacji ustawy znajdują się w tabeli 2.

Tabela 2. Porównanie powierzchni dostępnej dla energetyki wiatrowej dla wszystkich wariantów oraz względny wzrost powierzchni między wariantami W0 i W1

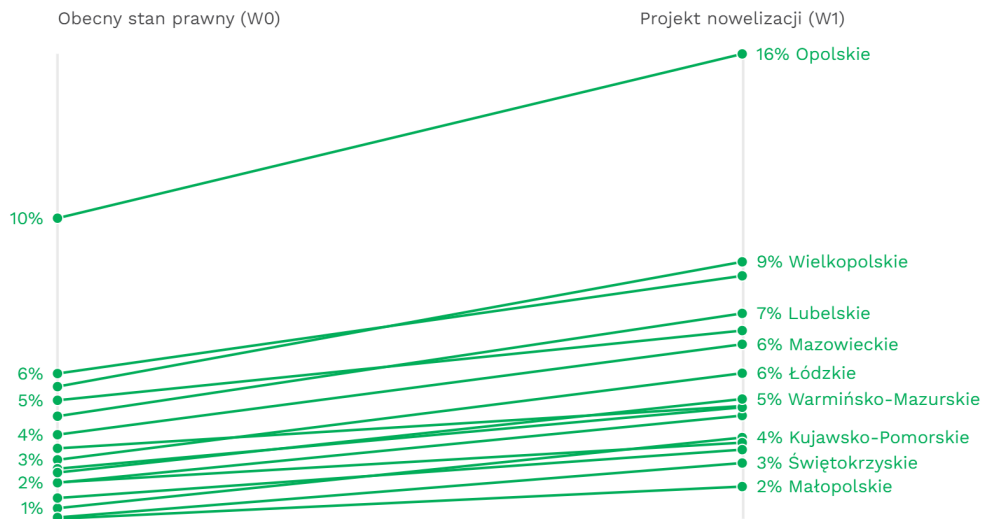
Województwo	Powierzchnia dostępna [km ²]			Wzrost powierzchni między wariantami W0 i W1 [%]
	W0	W1	W2	
Kujawsko-pomorskie	231	631	640	173
Świętokrzyskie	117	317	325	170
Małopolskie	145	299	309	106
Podlaskie	421	849	870	102
Łódzkie	511	1007	1044	97
Warmińsko-mazurskie	583	1140	1177	96
Śląskie	199	385	391	94
Mazowieckie	1280	2289	2340	79
Lubelskie	1051	1862	1908	77
Wielkopolskie	1523	2693	2747	77
Pomorskie	495	872	894	76
Podkarpackie	375	597	606	59
Dolnośląskie	1102	1713	1784	55
Opolskie	979	1464	1487	50
Zachodniopomorskie	1073	1574	1663	47
Lubuskie	443	630	668	42
Polska	10 529	18 323	18 850	74

W województwie opolskim w wariantcie nowelizacji (W1) aż 15,6% powierzchni województwa wykazuje potencjał budowy turbin wiatrowych. Województwo wielkopolskie oraz dolnośląskie też cechują się relatywnie dużymi współczynnikami, odpowiednio 9,0% oraz 8,6%. Wszystkie względne zmiany są przedstawione na rysunku 3.

Pod kątem wartości powierzchni na nowelizacji ustawy najbardziej zyskają województwa: wielkopolskie (+1120 km²), mazowieckie (+1008 km²) oraz lubelskie (+811 km²), co może wynikać z rozmiaru oraz struktury przestrzennej tych jednostek administracyjnych.

200 metrów robi wielką różnicę - aktualizacja obliczeń (10'2024)

Powierzchnia województw dostępna pod inwestycje wiatrowe w obecnym stanie prawnym (W0) oraz według projektu nowelizacji (W1) [%]



Źródło: opracowanie własne Instrat na podstawie danych z BDOT oraz PSEW
Stan prawny na 10'2024.



Rys. 3. Procent powierzchni województwa dostępny pod potencjalne elektrownie wiatrowe.
Porównanie wariantów W0 i W1

Źródło: [7]

Największe redukcje potencjału spowodowane dodatkowymi obostrzeniami środowiskowymi występują w województwach: zachodniopomorskim (-88 km^2), dolnośląskim (-71 km^2), wielkopolskim (-53 km^2) oraz mazowieckim (-51 km^2).

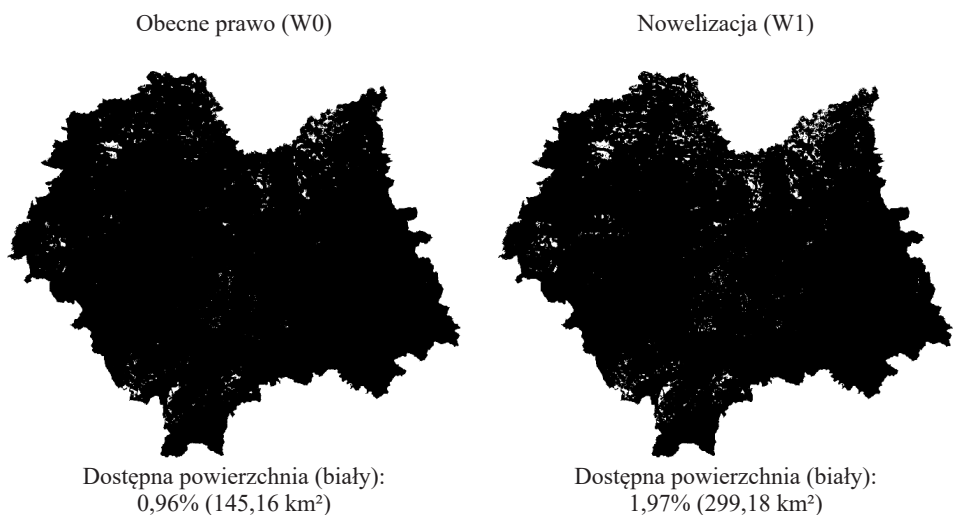
4. METODOLOGIA

Podstawowym źródłem informacji przestrzennych była otwarta *Baza Danych Obiektów Topograficznych w skali 1:10 000* (BDOT10k) udostępniona przez Geoportal.gov.pl [11]. Dane o lokalizacjach nietoperzy zostały udostępnione dzięki uprzejmości Polskiego Stowarzyszenia Energetyki Wiatrowej (PSEW).

Dane dotyczące każdego województwa pobierano z bazy BDOT10k w postaci skompresowanej do formatu .zip. Następnie autorski skrypt w języku Bash rozpakowywał pliki, przenosił niezbędne warstwy shapefile (.shp) do pożądanego folderu, aby ostatecznie usunąć zbędne pliki i zwolnić przestrzeń dyskową. Efektywne zarządzanie pamięcią było niezbędne ze względu na to, że rozpakowana BDOT10k zajmuje ponad 200 GB.

Kolejnym krokiem była selekcja pożądaných obiektów z warstw BDOT10k. Na przykład lokalizacje istniejących turbin wiatrowych znajdowały się w warstwie OT_BUWT_P wraz ze wszystkimi wysokimi budowlami technicznymi. Autorski skrypt w języku Python wykorzystujący bibliotekę Geopandas odpowiadał za proces generowania nowych warstw .shp wyłącznie z pożądanymi obiektami do procesu wykluczeń. Nieocenionym wsparciem w opracowaniu filtrów było *Vademecum użytkownika BDOT10k* wydane przez WODGIK Katowice [12].

Najważniejszym krokiem były obliczenia wykluczeń. Na podstawie preprocesowanych danych przestrzennych oraz przyjętych buforów odległości dla każdego województwa stworzono mapę wykluczeń. Na jej podstawie wyliczono powierzchnię potencjalnie dostępną pod budowę turbin wiatrowych. Obliczenia przeprowadzono za pomocą autorskiego skryptu zapisanego w notatniku Jupyter w języku Python z użyciem biblioteki GLAES [8, 13]. Mapy wykluczeń (rys. 4) eksportowano do plików .tif, a statystyki dostępnej powierzchni zapisano w pliku .csv. Na podstawie statystyk stworzono wizualizacje danych w programie Flourish, które opublikowano na stronie Fundacji Instrat [7].



Rys. 4. Przykładowe mapy wykluczeń wytworzone przy użyciu biblioteki GLAES dla województwa małopolskiego w wariantach wykluczeń 0 i 1

Obliczenia przeprowadzono na platformie Microsoft Azure za pomocą maszyny wirtualnej Standard E8as v4 (8 procesorów wirtualnych vcpu, 64 GiB pamięci). Aby ograniczyć emisję powstałe w trakcie obliczeń, wybrano centrum danych zlokalizowane w Szwecji. Tamtejszy system elektroenergetyczny generuje energię elektryczną w około 95% z niskoemisyjnych źródeł [14]. Proces pobierania i rozpakowywania wszystkich danych trwał około 200 min, zaś ich filtrowanie zajęło łącznie około 90 min dla wszystkich województw. Z uwagi na znaczną ilość przetwarzanych danych, nawet przy wykorzystaniu komputera o wysokiej wydajności jak na standardy z roku 2024, obliczenie wykluczeń dla wszystkich województw trwało 93 min.

5. PODSUMOWANIE

Potencjał energetyki wiatrowej w Polsce wciąż pozostaje nie w pełni wykorzystany. Prace nad ujednoliceniem i liberalizacją dotychczasowych zapisów to krok w stronę odblokowania rozwoju tej formy energii odnawialnej. Wprowadzenie nowelizacji ustawy UD89 znacząco powiększyłoby potencjalną powierzchnię dostępną do budowy turbin wiatrowych.

Mimo trwających wiele miesięcy prac nad nowelizacją nie powstały żadne ogólnodostępne badania opierające się na wszystkich założeniach zawartych w nowej treści ustawy. Dzięki połączeniu danych z różnych źródeł udało się opracować pierwszą całościową analizę w zaledwie trzy tygodnie po ogłoszeniu projektu ustawy.

Od 2016 roku proponowano różnorodne poprawki, co sprawiało, że poprzednie zewnętrzne analizy z dnia na dzień stawały się nieaktualne, a rzetelna komunikacja była utrudniona. Niepewność co do kierunku zmian prawnych oraz terminu ich wprowadzenia ogranicza konkurencyjność sektora i utrudnia proces inwestycyjny. Taka sytuacja podkreśla znaczenie otwartości danych i rzetelnej komunikacji w kształtowaniu polityk publicznych łączących różne grupy interesariuszy. Z pozoru niewielkie zmiany, takie jak różnica 200 m w wymaganej odległości od budynków mieszkalnych, mają znaczący wpływ na przebieg transformacji energetycznej.

Według stanu na początek marca 2025 roku nowelizacja UD89 z września 2024 roku nie miała jeszcze swojego czytania w sejmie.

Oświadczenia i podziękowania

Analiza została wykonana w ramach statutowych prac Fundacji Instrat, a wyniki pierwotnie zostały opublikowane na jej stronie. Niektóre wizualizacje są wspólne dla obydwu publikacji. Dziękuję PSEW za udostępnienie danych o siedliskach nietoperzy. Dziękuję Michałowi Smoleniowi, Michałowi Hetmańskiemu i Jarkowi Kopecowi za nieocenione wsparcie i rady w trakcie tworzenia analizy. Podziękowania należą się Michałowi Bukowińskiemu oraz Patrykowi Berusowi za sprawną komunikację wyników w ogólnopolskiej prasie, a także Laurze Gosiewskiej za cierpliwość oraz wsparcie redakcyjne.

LITERATURA

- [1] IPCC, *Summary for Policymakers*, [w:] *Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Cambridge University Press, Cambridge – New York 2022, <https://doi.org/10.1017/9781009157926.001>.
- [2] Energy.instrat.pl, *System elektroenergetyczny: Produkcja energii elektrycznej w Polsce*, <https://energy.instrat.pl/system-elektroenergetyczny/produkcja-entsoe/> [dostęp: 7.03.2025].
- [3] Energy.instrat.pl, *System elektroenergetyczny: Zainstalowana moc źródeł energii elektrycznej w Polsce*, <https://energy.instrat.pl/system-elektroenergetyczny/zainstalowana-moc-are/> [dostęp 7.03.2025].

- [4] *Ustawa z dnia 20 maja 2016 r. o inwestycjach w zakresie elektrowni wiatrowych*, Dz.U. 2016 poz. 961.
- [5] *Ustawa z dnia 9 marca 2023 r. o zmianie ustawy o inwestycjach w zakresie elektrowni wiatrowych oraz niektórych innych ustaw*, Dz.U. 2023 poz. 553.
- [6] Ministerstwo Klimatu i Środowiska, *Rządowy projekt ustawy o zmianie ustawy o inwestycjach w zakresie elektrowni wiatrowych oraz niektórych innych ustaw (UD89)*, wrzesień 2024.
- [7] Nowak K., Smoleń M., *Koniec walki z wiatrakami?* 15.10.2024, <https://instrat.pl/ustawa-wiatrakowa-2024/> [dostęp: 15.02.2025].
- [8] Ryberg D.S., Robinius M., Stolten D., *Evaluating Land Eligibility Constraints of Renewable Energy Sources in Europe*, *Energies*, vol. 11(5), 1246, 2018, <https://doi.org/10.3390/en11051246>.
- [9] Czyżak P., Sikorski M., Wrona A., *Co po węglu? Potencjał OZE w Polsce*, *Instrat Policy Paper 06/2021*, <https://instrat.pl/wp-content/uploads/2021/06/Instrat-Co-po-w%C4%99glu.pdf> [dostęp: 15.02.2025].
- [10] Polskie Stowarzyszenie Energetyki Wiatrowej, *Raport. Energetyka wiatrowa na nowo. Niezbędne zmiany legislacyjne i analiza potencjału onshore*, Warszawa 2024, https://www.psew.pl/wp-content/uploads/2024/09/Psew_2024_Energia_na_nowo_prawione.pdf [dostęp: 15.02.2025].
- [11] Główny Urząd Geodezji i Kartografii, *Baza danych obiektów topograficznych (BDOT10k)*, <https://www.geoportal.gov.pl/pl/dane/baza-danych-obiektow-topograficznych-bdot10k/> [dostęp: 16.02.2025].
- [12] Wojewódzki Ośrodek Dokumentacji Geodezyjnej i Kartograficznej w Katowicach, *Vademecum Użytkownika Bazy Danych Obiektów Topograficznych BDOT10k*, wyd. 2, Katowice 2024, https://wodgik.katowice.pl/www/pobierz/VADEMECUM_UZYTEKOWNIKA_BDOT10k.pdf [dostęp: 15.02.2025].
- [13] Ryberg D.S., Robinius M., Stolten D., *Methodological Framework for Determining the Land Eligibility of Renewable Energy Sources*, *ArXiv*, 2017, <http://doi.org/10.48550/arXiv.1712.07840> [dostęp: 15.02.2025].
- [14] IEA (Międzynarodowa Agencja Energii), *Sweden. Overview. Energy system of Sweden*, 2024, <https://www.iea.org/countries/sweden> [dostęp: 15.02.2025].

Julia Papée*

DESIGNING FOR INCLUSION: NAVIGATING THE OPPORTUNITIES AND CHALLENGES OF CROSS-CULTURAL UX

Universal design still raises questions about its compatibility with the idea of inclusivity. An alternative might be a cross-cultural approach, taking into account local or national cultures, symbols and customs, focusing more on the specific needs of the audience. These considerations are an important point in current discussions in the field of HCI and UX, especially in the context of strategies of international brands entering new markets. This article focuses on the attitudes of German and Swedish respondents towards universal and cross-cultural design. Although there are similarities between the two countries, the cultural differences within them in Hofstede's cultural model indicate that there may be different interface preferences. In-depth interviews were used to analyse whether users prefer culturally sensitive interface elements or a universal, standardised design. The objective of the study is to achieve a more nuanced understanding of user preferences and to provide an answer to the question of whether a universal approach is truly effective.

PROJEKTOWANIE Z MYŚLĄ O INKLUZYWNOŚCI: SZANSE I WYZWANIA MIĘDZYKULTUROWEGO UX

Projektowanie uniwersalne nadal budzi wątpliwości co do jego zgodności z ideą inkluzywności. Alternatywą może być podejście międzykulturowe, uwzględniające lokalne lub narodowe kultury, symbole i zwyczaje oraz skupiające się bardziej na specyficznych potrzebach odbiorców. Rozważania te są ważnym punktem w bieżących dyskusjach w dziedzinie HCI i UX, zwłaszcza w kontekście strategii międzynarodowych marek wchodzących na nowe rynki. Niniejszy artykuł koncentruje się na postawach niemieckich i szwedzkich respondentów wobec projektowania uniwersalnego i międzykulturowego. Chociaż istnieją podobieństwa między tymi dwoma krajami, różnice kulturowe w modelu kulturowym Hofstede wskazują, że mogą istnieć różne preferencje dotyczące interfejsów. Pogłębione wywiady zostały wykorzystane do przeanalizowania, czy użytkownicy wolą wrażliwe kulturowo elementy interfejsu, czy też uniwersalny, ustandaryzowany projekt. Celem badania jest osiągnięcie bardziej szczegółowego zrozumienia preferencji użytkowników i udzielenie odpowiedzi na pytanie, czy uniwersalne podejście jest naprawdę efektywne.

* AGH University of Krakow, Faculty of Humanities, UXberries.

1. INTRODUCTION

Questions about the reflection of culture online have become particularly relevant in an era of increasing globalisation, with the extraordinary growth of Internet accessibility. Although Mandarin Chinese, Spanish, English and Hindi are the most widely spoken languages in the world [1], English remains the dominant online language, closely followed by Russian and German. This linguistic diversity highlights the inequalities and potential difficulties for a large number of online users. If the role of language, as one of the most immediately evident differences, is not given adequate consideration, it demonstrates the enormous potential that lies in a different approach to designing interfaces.

An emerging and much discussed approach in user experience (UX) design is cross-cultural approach, which aims to emphasise local or national cultures in interfaces. It stands in opposition to the principles of universal design. While the latter tends to minimise cultural diversity in favour of broad consistency, the cross-cultural design treats culture as a unique asset, seeking to tailor interfaces more precisely to target audiences. Researchers in the field of human-computer interaction (HCI) tend to explore these differences [2–7] noting that cultural nuances can significantly affect how users perceive and trust digital interfaces. The subject of this research¹ is to investigate the views of interviewees from Sweden and Germany on cross-cultural UX design.

2. LITERATURE REVIEW

When considering an intercultural approach, it is important to emphasise that it aims to address the often discussed topic of digital inclusivity. However, in the context of this debate, direct recommendations do not always appear in this digital area. Valuable insights can be gained by looking at perceptions and research in the field of HCI. Researcher Segall identified an empirical and nativist divide in this field [8], in which nativists argue that experience is of minimal importance in the perceptual process, claiming that stimuli naturally contain all the features that are crucial for perception. This perspective is consistent, in a broad sense, with the philosophy of universal design, which underpins the idea that a single, standardised approach can be universally applicable. Empiricists, on the other hand, emphasise that experience and environment play a fundamental role in shaping perception, thus supporting a cross-cultural approach that takes into account culture-specific needs [8].

Cultural approach raises also considerations about the level of detail at which culture should be studied. Are continental differences the key to design, or do we need more precision and country-specific thinking [6]? Nisbett's theory distinguishes between analytical and holistic styles [9]. The former characterises Western European cultures, drawing on Greek philosophical traditions and placing a strong emphasis on central objects [10]. The holistic approach, on the other hand, emphasises the relationships between elements. The latter is characteristic of Asia and has been influenced by Chinese philosophy [9]. These different cognitive styles offer different perspectives on interface preferences, information hierarchy and product navigation (as presented in Table 1). In addition, recent research has highlighted the importance

¹ Research was conducted as part of the author's undergraduate thesis, and the article is based on it.

of cross-cultural insights across countries [11, 12]. Differences between European countries, as well as between continents, are increasingly compared using Hofstede's six-dimensional model [2, 7].

Table 1. Comparison between Greek and Chinese philosophy

Area	Greek philosophy	Chinese philosophy
Formalized logic	yes	no
Composition of a matter	discrete objects (atoms)	continuous substances
Focus attention on	salient objects and properties of these objects; objects and their properties categorized	field in which salient objects are located; relationship between objects and events in the field
Thinking	analytic	holistic
Tendency to	find the truth	find the harmony

Source: [8, p. 195]

Discussion about inclusion on the web often focuses on the availability of language, e.g. WCAG [13] aims to ensure that no user has been excluded on the basis of ability. However, inclusivity can also include a cultural layer. Interfaces can include local symbols, linguistic nuances or be better adapted to the cognitive preferences of a particular group. Marcus [2] explains that culture plays a big role in how users see, understand, and interact with technology. That's why elements like metaphors, mental models, design, navigation, and interaction need to be aligned with cultural expectations – it makes interfaces feel more natural and user-friendly for a specific audience [2].

Despite the cases that encourage cultural adaptation, universal design still has some advantages. It reduces development costs by reusing templates and components across multiple markets, promotes a consistent brand identity and maintains a sense of familiarity for users around the world. Don Norman's [14] comment that "Technology changes quickly, people and culture change slowly. The more things change, the more they remain the same" highlights how universal solutions, once mastered, can effectively serve a wider audience. However, Norman [14] also acknowledges that standards that appear universal in one context, such as driving the car on the right side of the street, are not universally applicable when viewed in a broader global context. The fact that many countries drive on the left, highlights the discrepancy between perceived and actual universality.

3. METHODOLOGY

3.1. PROBLEM AND RESEARCH QUESTIONS

The implementation of cross-cultural design in the digital interface provides both benefits and challenges. From a scientific point of view, it enhances inclusion, improves the purposeful use for diverse users, and follows the best UX practices by creating a user-centric

experience. This makes digital products more sensitive and attractive to people of various cultural backgrounds. However, from a professional point of view, it can be expensive. If companies intend to invest in localised materials, culturally relevant visuals and usability testing, they need to consider both the time and money spent on this process. There is also a strategic decision, whether companies should prioritise a universal design to facilitate efficiency, or tailor the interface to cultural preferences and potentially encourage greater user engagement at the cost of scalability.

An important question is how users see cross-cultural design. While companies can see it as an improvement, do users feel the same way? Are they more attached when interfaces reflect their cultural expectations, or do they prefer standardized designs? It is important to understand user preferences in order to assess the effectiveness of cross-cultural UX strategies.

The purpose of the research is to answer the following questions:

1. What is the level of awareness among users regarding cross-cultural design?
2. What is the general attitude of users towards cross-cultural design in digital interfaces?
3. What do respondents perceive as the most critical factor in cross-cultural UX design?

By answering these questions, this study aims to bridge the gap between academic theories of cultural adaptation in UX and practical user preferences, providing insights that can help designers and companies navigate the complexities of cross-cultural digital experiences.

3.2. FUNDAMENTAL CONCEPT OF ANALYSIS AND SPECIFICITY OF RESEARCH SUBJECT

Understanding the role of culture in the design of digital interfaces is fundamental to this research. Hofstede [15, p. 24] defines culture as “the collective programming of the human mind that distinguishes members of one human group from members of another”. In this sense, culture is a system of shared values. In addition, culture includes shared values and preferences, which Hofstede [16, p. 59] describes as “a broad tendency to prefer certain states of affairs over others”. The concept of culture also covers language, customs, symbols and practices [17]. In this respect, digital interfaces act as a medium through which cultural characteristics are reflected and influence users interactions, perceptions and expectations.

A critical aspect of culture is also language, which shapes the way people process information and navigate digital interfaces. Language, apart from its main function of communication, also carries deeper cultural meanings. It allows users to interpret certain design elements differently and interact with interfaces.

UX designers also play an important role in the process of creating cross-cultural interfaces. It is through them that experience can be cross-cultural. They are responsible for designing the user path from the beginning of the interaction to its end [18]. Conversely, by UI we can understand the sub-discipline of UX, which focuses on the visual and interactive elements of a product.

Another important factor in interface design is credibility. Fogg et al. [5] defines it based on Prominence-Interpretation (P-I) theory, which suggests that a user’s credibility assessment

occurs when the user notices an element – prominence, or when the user makes an evaluation of that element – interpretation. If one of these two elements does not occur, the credibility assessment will not take place.

A key objective of this study is also cross-cultural awareness, which is the extent to which users recognise cultural adaptations in digital interfaces. Awareness can significantly shape users' perceptions and attitudes towards intercultural design. As the study involves average users rather than UX professionals, it does not assume a deep technical understanding of intercultural design. Instead, intercultural knowledge can be divided into three levels:

- Demonstrating a good understanding of the topic can be achieved by discussing practices that can be applied across various sites, or sharing observations from exploring diverse websites, or showing familiarity with researchers such as Hofstede who have studied cultural differences or other cross-cultural design researchers.
- Moderate familiarity with the topic may involve being aware of the differences among websites based on their domain of origin, without necessarily being able to identify examples of cross-cultural design in interfaces from their country of origin or different ones.
- Weak familiarity is a situation where respondents lack accurate associations and are unable to identify factors within sites that appear to be related to their own or another foreign culture.

By examining these levels of awareness, the purpose of this study is to assess how cultural familiarity affects users' preferences. Understanding these nuances will provide valuable insights on how users connect with digital interfaces in various cultural contexts and whether they consider cultural adaptation beneficial or unnecessary.

3.3. SAMPLE SELECTION AND RESEARCH TOOLS

To ensure cultural relevance, respondents had to have at least two generations of family roots in their home country, Sweden or Germany. This requirement was meant to focus on people with strong cultural roots and to ensure that participants could provide insights based on their home cultural environment. Recruiting participants in foreign countries was challenging, so gatekeepers were used to facilitate recruitment based on pre-defined selection criteria. In addition, English language skills were mandatory because the study was conducted in English. When discussing cultural issues, using a foreign language can make it more difficult to express complex ideas. But this can also have the advantage of encouraging respondents to take a step back and think about their cultural identity from a new perspective, which can lead to deeper insights. The study involved 12 respondents, five from Sweden and seven from Germany, as detailed in Table 2. Due to difficulties in finding male participants, there was a lack of diversity in the Swedish group.

In his research, Hofstede divided countries into six distinct cultural clusters: Anglo, Nordic, German, Latin, Asian and Japan, based on shared cultural characteristics and historical background [11]. This study aims to delve into the comparative analysis between the Nordic and German clusters, shedding light on their different cultural dynamics in the broader context of interface design. Having chosen Sweden and Germany for closer examination, despite their geographical and cultural proximity, Hofstede's model revealed significant contrasts

between the two, offering intriguing insights for further research [19]. It is noteworthy that both countries show similar scores on the dimensions of low Power Distance, high Individuality and moderate Long-Term Orientation, while differences were observed in the dimensions of Masculinity – Femininity, Uncertainty Avoidance and Indulgence – Restraint [20]. This diversity in the group can lead to interesting and nuanced conclusions in approaching cross-cultural UX design.

Table 2. Information about respondents

Code	Nationality	Sex
SF01	Swedish	female
SF02	Swedish	female
SF03	Swedish	female
SF04	Swedish	female
SF05	Swedish	female
GM01	German	male
GM02	German	male
GF01	German	female
GF02	German	female
GM03	German	male
GM04	German	male
GF03	German	female

As for the research methods, I have decided to conduct a qualitative study using in-depth interviews (IDI) in a semi- structured format. This approach will allow me to establish a relaxed tone and provide the opportunity for participants to offer their insights, which a questionnaire would not allow [21]. In the study, I used a pre-designed script, which ensured that all important topics were covered while allowing flexibility in the interview. To ensure a comfortable experience for the respondents, it was important to establish a bond with participants from the beginning, to ensure a comfortable experience in answering questions. The research was conducted remotely via Google Meet platform, due to the distance of these countries from Poland. The interview themes were based on the users experiences with digital products. They covered the topics of their usability, visual side (UI), the difficulties faced while using them, or the topic of accessibility. Questions focused also on users trust while using interfaces or memorable experiences with them. Respondents were also asked about their knowledge of intercultural practices, their feelings about cultural identity within interfaces, and their preference for cross-cultural or universal design practices.

4. RESEARCH RESULTS

4.1. CROSS-CULTURAL DESIGN AWARENESS

Participants approached the concept of cross-cultural design with varying degrees of familiarity. It is worth noting that the respondents were not professional designers, and thus were talking about their feelings from an end-user perspective. In their responses, they demonstrated a lack of confidence, yet they were willing to share their ideas and assumptions about the potential meanings of such a concept. Languages and inclusivity were among the keywords highlighted by them. Some also stressed that the sites should enable users to shop online with the same ease and satisfaction, no matter where they are.

It would mean that someone from New Zealand can buy as quick, with the same satisfaction and with the same understanding... as someone in Alaska. (GM04)

I guess cross cultural design means that it's appealing to all of the cultures. (GM03)

There was also the issue of left-to-right and right-to-left reading, which was mentioned by respondents as an echo of the language threads and one of the changes they felt could significantly affect the design of the site and thus be part of a cross-cultural approach. Another point raised was colour, its meaning and symbolism. One of the Swedish respondents spoke about this in the context of different cultural approaches to colour around the world, and how the meaning of colour in one country can be quite different in another. This may also be an important consideration in a design approach that pays attention to cultural threads.

I think that the graphics should be something that you understand in both countries, I mean, maybe in one country, red is a symbol for something and in the other country it's maybe another colour that is a symbol. So something that you need to have in mind is to design the page so that it will fit both cultures. (SF02)

On the other hand, participants with experience of living or studying abroad gave more nuanced responses, describing how the structure and communication style of websites often reflected local norms. One respondent with a German-Italian relationship and experience of living in both countries shared an experience where she only realised after some time that when she was looking for a website to help her solve a problem, she unconsciously chose a German site over an Italian one because its structure and communication style reminded her more of what is familiar, what she knows and associates with home.

This echoes research by Evers and Day [3] which suggests that interface design preferences influence usability beliefs, and that the interface acceptance process differs between cultures. For example, for the Chinese, acceptance proceeds through preference, usability and satisfaction, whereas for Indonesians usability is more important, and Australians are satisfied if the interface meets their preferences, even if the system is difficult to use or unusable [3]. Discussions about images and visual references also highlighted how early forms of communication, such as symbolic paintings, remain relevant to contemporary interface design, as one German respondent pointed out the etymology of the word *bildung*.

The first language that people used when it comes to communicating was symbolic. Back in the medieval ages, we had paintings and so on. Paintings provided information. In Germany we say *bildung*, and in English it's education. But *bildung* in German means pictures. Someone who is *gebildet* – educated, means someone who saw a lot of pictures. (GM04)

This suggests that universal design elements (icons, images or other visual elements) may still be culturally relevant. Respondents who emphasised their greater international experience were more likely to perceive websites as culturally influenced, citing factors such as language or visual elements. Even if the interfaces are not always directly identified by people as cultural carriers, it is these elements that can affect the user experience in a more or less visible way for some. Using cultural models and considering aspects such as language, location and cultural values can lead to more effective and satisfying interfaces [2].

4.2. SHOULD INTERFACES EMBRACE CULTURE?

Respondents from both the Swedish and German groups were about evenly split in their responses about a preference for interfaces that take cultural issues into account, or a preference for a global-universal approach.

Desire for Culturally Adapted Interfaces

Language

Language emerged as a key determinant in the interviews, associated with a cross-cultural approach. It was also one of the most visible changes in the interface for respondents. However, as noted before, it is also an issue of ICT accessibility for different audiences, which is often a cause of digital exclusion [1].

I mean, the first thing that comes to my mind is, like, language. First, like being able to adjust, like, the design to fit different languages. (SF04)

If it's like a little bit smaller shop, you can feel it, that it is more Swedish, because they are providing more text in Swedish and so on. (SF02)

I think it could benefit from there being more fostering of cultures and such. Maybe not like for each country, but maybe one for Europe and one for Asia. I think we have very different use. (SF05)

Such comments underline the desire to take into account cultural differences at a regional or continental level, even if not every country will have a fully adapted site. Another participant stressed the importance of the natural desire of users to feel comfortable and cared for on a site that feels specially designed for them and meets their expectations.

I feel like everyone probably wants to feel like it's made for them. (SF01)

This view is also part of the narrative of other researchers, such as Marcus [2], who notes that many countries have many national languages, such as South Africa with 11 and India with 23. English, even if it is the official language, may not be spoken by the majority. Design, therefore, presents a huge challenge, but also an opportunity. The researcher also stresses that culture is an important part of the whole process, not just language, therefore it is worth considering communities that have their own jargon, signs and rituals [2].

So then yeah embracing culture. I think it is good, I think diversity is good. (GM01)

Beyond the linguistic factor itself, such considerations illustrate a deeper belief that cultural representation, whether through local visual, linguistic representations or payment methods, strengthens the user's emotional connection and trust in the interface. As a result, local language and textual cues appear not only as functional aids, but also as symbols of integration and recognition in a cross-cultural environment.

Identity with One's own Culture

In addition to pure practicality, participants often linked design elements, such as colour schemes, images or page structure to a sense of national or regional identity, suggesting that interface design can signify deeper cultural values. For example, many Swedish respondents emphasised minimalist layouts and muted colour palettes as inherently Scandinavian, in line with the view that local design conventions evoke a sense of belonging and comfort. Interestingly, some German respondents also associated this described style with images specific to Scandinavia.

Simple web pages, but with very neutral colours and like soft finishing... It feels quite Swedish, just the general style. For both interior and pages, like, very simplistic with neutral colours. (GM04)

Always in Volvo, which is a Swedish brand, they use like nature and snow. (SF04)

Comments such as these illustrate how the visual motifs in these photographs, which relate to snow, nature or Scandinavian landscapes, clearly reinforce the Scandinavian aesthetic. Interestingly, in the case of the German group, the visual aspect was not so strongly emphasised. Respondents in this group were more likely to emphasise that the website should help to fulfil the intended purpose of the site in the simplest way possible. This also underlines the importance these groups placed on aesthetic issues. In the Swedish group, these were often mentioned, whereas in the German group, the functionality of the site resulting from the design was more often emphasised.

Simplistic with neutral colours. [about web page] (SF05)

The respondent's preference for the intercultural shows that it gives them a greater sense of belonging and a feeling of comfort in the environment they expected. In addition to the linguistic themes, the visual level also proved to be a certain determinant. This can include the colour scheme mentioned above, but also the styling of the images and even the hierarchy of information and layout, which can emphasise completely different themes. Whether it is the minimalism mentioned for the Swedish group or the greater emphasis on detailed information in Germany, the respondents often interpreted these indicators as a sign of authenticity and conformity with their needs in relation to the interface.

Credibility & Cross-Cultural

While identification with one's own culture carries a lot of emotional weight, there are also more practical cross-cultural applications that can contribute to credibility. One possibility is locally adapted payment systems. This is also supported by Shen's [12] research, which highlights the localisation of the PayPal service for interfaces aimed at the German group.

I feel like a lot of my friends have and use Klarna, at least when they feel like a website is a bit sketchy. (SF01)

Offering users familiar payment methods increases the legitimacy of the website project and reduces perceived risk. The previously mentioned PayPal did not quite resonate with the Swedish group, where Klarna was a frequently discussed payment method. In addition to the familiarity of this method, users in this group often highlighted the additional benefits of this solution, which further increased payment security, especially on sites that were less reliable for users.

I mean, the first thing that comes to my mind is... being able to adjust, like, the design to fit different languages. (SF01)

This perspective is also consistent with the views of Minkov's [22] critique, which points out the imperfections of Hofstede's model. It is a model that is often used in research or adaptation of interfaces from an intercultural perspective. The researcher emphasises that culture is changing, so the 1980s cultural model is outdated in many aspects. This highlights the complexity of cultural issues and the advantage of the simplicity of universal design.

However, brands and culture are intertwined and influence each other. On the one hand, strong global brands can influence local cultures by introducing new products, values and lifestyles. On the other hand, culture influences the way a brand is perceived and received, so companies need to take cultural differences into account in their marketing strategies and user interface design [2].

Universal Design Perspective

However, some respondents felt that the universal design approach was preferable. The main argument was often that such interfaces reduce complexity by relying on the same familiar structure. This is in line with Norman's [14] principle that once an interface pattern is learned, its consistency can reduce cognitive load. Giving up the familiarity of an interface that looks the same everywhere can also give us a sense of security and credibility, especially if we liked the original version.

I think like a globalized way because I feel like the world is generally going to diminish the limits... So there are already so many things that you order digitally or browse... that are not from your own country. (SF04)

However, it is worth noting that, like the credibility factor in Fogg et al. [5] study, P-I theory emphasises that a user's credibility assessment occurs when the user notices an item and then makes an interpretation. User's awareness of cross-cultural approaches was not as high, so some of their noticing may not have occurred as often, so without a full understanding of cross-cultural, they may have preferred solutions that seemed more familiar to them.

I personally like a bit more this globalized aspect. I don't know, I wouldn't like that I see my home country flag... showing me like, hey you're in Germany. (GM02)

In addition, some respondents stressed that they associated this approach with an over-representation of the symbols or colours of a particular nation. This was described as undesirable as they did not want constant reminders of cultural characteristics (such as flags). Another

issue raised was accessibility, which some felt was more exposed in universal design, as they thought it supported easier understanding and navigation for a wider audience.

IKEA is a great example of such implementation for the brand. Because in IKEA, everyone looked like European. Then, when they launched it, I think in Asia, they actually had people who looked Asian in the whole brand concept, like on the photos and stuff. And I quite like that when they adopt the imagery to that culture. (SF01)

However, it is noticeable that even some of the larger brands, such as IKEA or McDonald's (example of culturally diverse sites can be seen in Fig. 1), which we might associate with globalisation and therefore with universal design, are betting on differentiated solutions that are in line with cross-cultural approaches. This shows that even these larger brands are betting on culturally adapted solutions because they see the benefits of adopting them.



Fig. 1. McDonald's website comparison across countries

Source: [23]

5. SUMMARY

In conclusion, familiarity with the term cross-cultural was moderate among respondents. They often had a good idea about the concept, but lacked a more in-depth knowledge of it, to be able to identify some of the better known practices. About half of the interviewees were in favour of a cross-cultural approach to interface design, often arguing for it by being more inclusive of cultures and highlighting these threads as good practice. The most important factor in this approach was the respondent's desire for language adaptation on the pages. Although almost half were in favour of universal design, this may have been due to a lack of understanding of the cross-cultural approach.

Almost all respondents mentioned language customisation and payment preferences on the sites. Descriptions of desired interfaces also differed between the Swedish and German groups, highlighting their different needs and emphasis on different themes. The Swedish group was more likely to talk about aesthetic/visual issues and the associated interface presentation, while the German group was more likely to mention the performance and speed of tasks within the site. Respondent's arguments also often converged, despite an initial preference for a cross-cultural or universal design approach. This is also consistent with the P-I theory [5] that if we do not notice something, we cannot interpret it. This would suggest that if there was more knowledge about cross-cultural design among respondents, then perhaps this would contribute to a higher percentage of those in favour of cross-cultural approach.

REFERENCES

- [1] Porębski L., *Technologia – społeczeństwo – kultura. Wyzwania współczesnego świata* [Lecture], AGH University of Science and Technology, Krakow 2025.
- [2] Marcus A., *Cross-Cultural User-Experience Design*, [in:] Barker-Plummer D., Cox R., Swoboda N. (eds.), *Diagrammatic Representation and Inference*, Springer 2006, pp. 16–24, https://doi.org/10.1007/11783183_4.
- [3] Evers V., Day D., *The Role of Culture in Interface Acceptance*, in: Howard S., Hammond J., Lindgaard G. (eds.), *Human-Computer Interaction INTERACT '97: IFIP TC13 International Conference on Human-Computer Interaction, 14th–18th July 1997, Sydney, Australia*, Springer US, 1997, pp. 260–267, https://doi.org/10.1007/978-0-387-35175-9_44.
- [4] Sun H., *Cross-Cultural Technology Design: Creating Culture-Sensitive Technology for Local Users*, Oxford University Press, USA, 2012.
- [5] Fogg B.J., Soohoo C., Danielson D.R., Marable L., Stanford J., Tauber E.R., *How do users evaluate the credibility of Web sites? A study with over 2,500 participants*, [in:] *Proceedings of the 2003 Conference on Designing for User Experiences*, New York, NY: Association for Computing Machinery, 2003, pp. 1–15, <https://doi.org/10.1145/997078.997097>.
- [6] Laracon EU (Director), *Build bridges, not walls – Design for users across cultures – Jenny Shen – Laracon EU 2018 Amsterdam*, 27 November 2018, <https://www.youtube.com/watch?v=uPsMTpdfWTI> [access: 20.11.2023].
- [7] Eristi S., *Cultural factors in web design*, *Journal of Theoretical and Applied Information Technology*, vol. 9, no. 2, 2009, pp. 117–132.
- [8] Čeněk J., Čeněk Š., *Cross-cultural differences in visual perception*, *Journal of Education Culture and Society*, vol. 6, no. 1, 2020, pp. 187–206.
- [9] Nisbett R., Peng K., Choi I., Norenzayan A., *Culture and systems of thought: Holistic versus analytic cognition*, *Psychological Review*, 2001, vol. 108, no. 2, pp. 291–310, <https://doi.org/10.1037/0033-295X.108.2.291>.
- [10] Koo M., Choi J.A., Choi I., *Analytic versus holistic cognition: Constructs and measurement*, [in:] *The psychological and cultural foundations of East Asian cognition: Contradiction, change, and holism*, Oxford University Press, 2018, pp. 105–134.

- [11] Robbins S.S., Stylianou A.C., *A Study of Cultural Differences in Global Corporate Web Sites*, *Journal of Computer Information Systems*, vol. 42, no. 2, 2002, pp. 3–9.
- [12] Shen J., *Cross-cultural Design and the Role of UX* | Toptal®, *Toptal Design Blog*, n.d., <https://www.toptal.com/designers/web/cross-cultural-design> [access: 20.11.2023].
- [13] *A Guide to WCAG | Web Accessibility Guidelines Overview*, 2024, <https://www.wcag.com/resource/what-is-wcag/> [access: 28.02.2025].
- [14] Norman D., *Dizajn na co dzień [The Design of Everyday Things]*, transl. D. Malina, Karakter, Kraków 2018.
- [15] Hofstede G., *Culture and Organizations*, *International Studies of Management & Organization*, vol. 10 (4), pp. 15–41, 1980. <https://doi.org/10.1080/00208825.1980.11656300>
- [16] Berry J.W., *Cross-Cultural Psychology: Research and Applications*, Cambridge University Press, 2002.
- [17] Britannica, *Culture: Definition, Characteristics, Examples, Types, Tradition, & Facts*, n.d., <https://www.britannica.com/topic/culture> [access: 6.04.2024].
- [18] *What is User Experience (UX) Design? – Updated 2023*, The Interaction Design Foundation, <https://www.interaction-design.org/literature/topics/ux-design> [access: 1.01.2024].
- [19] Hofstede G., *Dimensionalizing Cultures: The Hofstede Model in Context*, *Online Readings in Psychology and Culture*, vol. 2, no. 1, 2011, <https://doi.org/10.9707/2307-0919.1014>.
- [20] *Country comparison tool*, n.d., <https://www.hofstede-insights.com/country-comparison-tool> [access: 5.01.2024].
- [21] Allmark P., Boote J., Chambers E., Clarke A., McDonnell A., Thompson A., Tod A.M., *Ethical issues in the use of in-depth interviews: literature review and discussion*, *Research Ethics*, vol. 5, no. 2, 2009, pp. 48–54.
- [22] Minkov M., *A revision of Hofstede's model of national culture: Old evidence and new data from 56 countries*, *Cross Cultural & Strategic Management*, vol. 25, no. 2, 2017, pp. 231–256.
- [23] Kartscrut, *Why websites look so different worldwide*, *Bootcamp*, 4 October 2024, <https://medium.com/design-bootcamp/why-websites-look-so-different-worldwide-8a1b9b533b99> [access: 30.11.2024].

Klaudia Piątek*

SŁUCHOWISKA BINAURALNE W ROZWIJANIU ORIENTACJI PRZESTRZENNEJ

Nagrania binauralne dzięki precyzyjnemu odwzorowaniu przestrzeni akustycznej mogą stanowić cenne narzędzie wspierające rozwój orientacji przestrzennej u osób z dysfunkcją wzroku. W artykule omówiono mechanizmy percepcji dźwięku, takie jak HRTF (*Head-Related Transfer Function*), ITD (*Interaural Time Difference*) i ILD (*Interaural Level Difference*), które odgrywają kluczową rolę w nagraniach przestrzennych. Przedstawiono metodologię tworzenia słuchowisk edukacyjnych, umożliwiających użytkownikom trenowanie zdolności identyfikacji źródeł dźwięku oraz rozpoznawania otoczenia na podstawie krajobrazu dźwiękowego. W części badawczej przeanalizowano wyniki testów odsłuchowych przeprowadzonych na podstawie pierwszego udostępnionego słuchowiska. Analiza wskazuje na potencjał takich materiałów zarówno w kontekście treningowym, jak i badawczym – szczególnie w zakresie rozwijania percepcji słuchowej.

BINAURAL AUDIO PLAYS IN THE DEVELOPMENT OF SPATIAL ORIENTATION

Binaural recordings, due to their precise reproduction of acoustic space, can serve as a valuable tool for enhancing spatial orientation in individuals with visual impairments. This article discusses sound perception mechanisms such as HRTF (*Head-Related Transfer Function*), ITD (*Interaural Time Difference*), and ILD (*Interaural Level Difference*), which play a crucial role in spatial audio recordings. The methodology for creating educational audio plays is presented, allowing users to train their ability to identify sound sources and recognize their surroundings based on the auditory landscape. The research section analyzes the results of listening tests conducted using the first published audio play. The findings indicate the potential of such materials in both training and research contexts, particularly in developing auditory perception skills.

1. WSTĘP

Każdego dnia funkcjonujemy w określonej przestrzeni. Są to np. kolejne pomieszczenia w domach – takie jak kuchnia, łazienka, salon, sypialnia. Po wyjściu z domu idziemy ulicą, napotykamy skrzyżowania, przejścia dla pieszych, przystanki, docieramy do miejsca pracy,

* AGH Akademia Górniczo-Hutnicza, Wydział Inżynierii Mechanicznej i Robotyki, Koło Naukowe Inżynierii Akustycznej.

na spotkania z przyjaciółmi, idziemy do restauracji, wyjeżdżamy na wakacje. Zwracamy uwagę głównie na wygląd tych przestrzeni i używamy zmysłu wzroku do swobodnego przemieszczania się oraz szybkiej oceny otoczenia. A co stanie się, gdy ten zmysł zostanie osłabiony lub go zabraknie? Na czym będziemy się opierać? Jak ocenimy, gdzie się znajdujemy i co nas otacza?

Dla osób z dysfunkcją wzroku, a szczególnie dla osób niewidomych, problem z rozpoznaniem przestrzeni za pomocą oceny wizualnej jest zjawiskiem codziennym. Takie osoby muszą polegać na innych zmysłach, by móc stwierdzić, gdzie się znajdują. Uczą się tego podczas sesji z mentorem, który tłumaczy im, na co zwracać uwagę. Nasuwa się pytanie, czy można przygotować materiały edukacyjne do ćwiczeń indywidualnych poza zajęciami. Jedną z technik, zgodną ze standardem nauczania orientacji przestrzennej, jest wykorzystanie nagrań binauralnych. Niestety takich ćwiczeń jest zwykle za mało [1]. W niniejszym artykule przedstawiono sposób użycia nagrań binauralnych krajobrazów dźwiękowych jako materiałów edukacyjnych do treningu orientacji przestrzennej.

Głównym celem pracy jest zaprojektowanie słuchowisk wspierających trening percepcji słuchowej u dzieci z niepełnosprawnością wzroku. Wymaga to przeglądu literatury dotyczącej funkcjonowania zmysłów oraz życia osób niewidomych. W ramach projektu opracowana zostanie metoda treningu orientacji przestrzennej oraz zestaw ćwiczeń w formie słuchowisk. Efektem końcowym pracy będzie ogólnodostępna baza materiałów edukacyjnych, umożliwiająca rozwijanie zdolności słuchowych w kontekście rozpoznawania przestrzeni dźwiękowej. Systematyczny trening percepcji słuchowej może pomóc dzieciom z dysfunkcją wzroku w samodzielnym poruszaniu się oraz zmniejszyć lęk przed nieznany otoczeniem.

Artykuł składa się z kilku części, które systematycznie przedstawiają tematykę projektu oraz metodologię jego realizacji. W pierwszej części omówiono zagadnienie krajobrazu dźwiękowego, nagrań binauralnych oraz mechanizmy z nimi związane. Następnie dokonano przeglądu literatury dotyczącej zmysłów oraz adaptacyjnych możliwości mózgu człowieka. Kolejna część opisuje metodologię opracowywania materiałów edukacyjnych, którymi są słuchowiska binauralne. W części badawczej zaprezentowano wyniki analizy odpowiedzi uczestników ćwiczeń zawartych w słuchowiskach oraz ich interpretację w kontekście skuteczności treningu percepcji słuchowej. Artykuł kończy się podsumowaniem wykonanej pracy oraz propozycjami dalszego rozwoju projektu.

2. KRAJOBRAZ DŹWIĘKOWY I TECHNIKA NAGRAŃ BINAURALNYCH

Krajobraz dźwiękowy można opisać jako zbiór różnych dźwięków występujących w danej przestrzeni. Na przykład opisując krajobraz dźwiękowy, którym jest las, wymienimy śpiew ptaków, szuranie liści podczas przemieszczania się osób lub zwierząt, głosy zwierząt, szum drogi w oddali, świst wiatru lub rozmowy ludzi. Natomiast w bardziej zurbanizowanym krajobrazie dźwiękowym, takim jak chociażby biuro, prawdopodobnie napotkamy dużo większą liczbę dźwięków wydawanych przez urządzenia elektryczne, na przykład drukarkę, komputery, telefony. Można również usłyszeć odgłosy miasta za oknem [2].

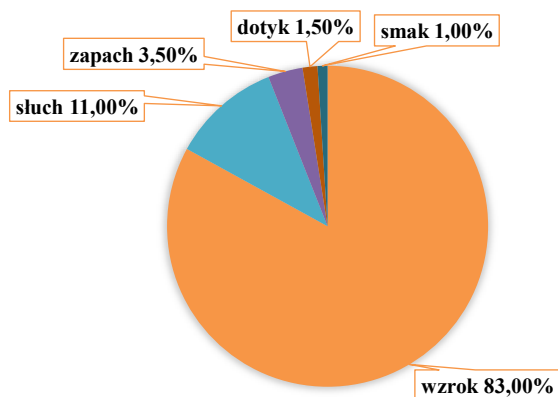
Nagrania binauralne to zapis dźwięku za pomocą mikrofonów umieszczonych w uszach człowieka lub sztucznej głowie. Mikrofony mogą znajdować się tuż za kanałem słuchowym lub na jego dnie, blisko błony bębenkowej. Ta technika nagrywania pozwala uzyskać obraz dźwiękowy, który podczas odsłuchu na słuchawkach daje wrażenie przebywania w przestrzeni, w której zostało wykonane nagranie. Jest to możliwe dzięki funkcji przenoszenia głowy (HRTF – *Head Related Transfer Function*), która opisuje, w jaki sposób uszy, głowa i tułów wpływają na transmisję sygnału akustycznego od źródła do błon bębenkowych [3].

Podczas nagrywania binauralnego istotną rolę odgrywa kąt padania fal dźwiękowych na głowę słuchacza. W zależności od tego kąta fale dźwiękowe są modyfikowane przez odbicia od małżowiny usznej oraz różnice czasu (ITD – *Interaural Time Difference*) i poziomu między uszami (ILD – *Interaural Level Difference*). Szczególnie istotny jest efekt cienia głowy – osłabienie amplitudy dźwięku docierającego do ucha dalszego od źródła. Efekt ten jest najbardziej wyraźny w wyższych częstotliwościach. Dzięki tym zjawiskom nagrania binauralne umożliwiają dokładniejsze odwzorowanie lokalizacji dźwięków w przestrzeni, co jest kluczowe w kontekście treningu orientacji przestrzennej [4].

Warto podkreślić, że funkcja HRTF jest inna w przypadku każdej osoby, co wynika z unikalnej budowy anatomicznej głowy, uszu i tułowia danego człowieka. Oznacza to, że nagrania binauralne, choć skuteczne w symulacji przestrzeni dźwiękowej, mogą nie być jednakowo precyzyjne dla każdego słuchacza. Niektóre osoby mogą doświadczać nieco przesuniętych wrażeń lokalizacji dźwięku w stosunku do rzeczywistości [5].

3. CZY UTRATA WZROKU WPŁYWA NA ROZWÓJ INNYCH ZMYŚLÓW?

Wyróżniamy pięć podstawowych zmysłów: wzrok, słuch, smak, węch oraz zmysły somatyczne (dotyk). Według badań naukowców każdy zmysł przetwarza inną wartość informacji pozasłownych ze świata zewnętrznego w tym samym czasie. Szacunkowo najwięcej wiadomości dostarcza człowiekowi wzrok (rys. 1), a na drugim miejscu klasyfikuje się słuch [6].



Rys. 1. Procentowy podział odbioru informacji przez zmysły na podstawie badań [6]

Wspomniany podział odbierania informacji zmysłami dotyczy wyłącznie osób widzących. Dla osób z dysfunkcją wzroku rozkład będzie inny. Czy oznacza to, że możemy zastąpić jedno zmysły innymi? Na to pytanie odpowiedzieli naukowcy podczas badań zmian strukturalnych i funkcjonalnych łączności w przypadku głębokiej wczesnej ślepoty. Porównywali wyniki rezonansu magnetycznego mózgu osób widzących i osób niewidomych od urodzenia oraz takich, które bardzo wcześnie utraciły wzrok. Odkryli, że u osób pozbawionych zmysłu wzroku zachodzi spadek objętości korowej i grubości kory w obszarach kory potylicznej i skroniowej, czyli miejscach przetwarzania informacji wzrokowych. Zaobserwowali również zwiększenie objętości korowej w obszarach kory ciemieniowej, a także nowe połączenia w istocie białej [7]. Jest to możliwe dzięki plastyczności mózgu człowieka. Jednak te wszystkie zmiany nie spowodowały, że zmysł wzroku został zastąpiony innym. Z neurologicznego punktu widzenia jest to niemożliwe. Nie można fizycznie zwiększyć czułości zmysłów, ale percepcja może zostać udoskonalona. Osoby niewidome mają wyostrożone inne zmysły dzięki odpowiednim treningom i ciągłej stymulacji. Zatem można sądzić, że każda osoba, która poświęci wystarczającą ilość czasu na trening konkretnego zmysłu w danym celu, może zauważyć efekt jego wyostrożenia. Dobrym przykładem są zajęcia w szkołach muzycznych. Dzięki systematycznym ćwiczeniom i pozyskiwaniu specjalistycznej wiedzy uczniowie tego typu placówek oświatowych są w stanie usłyszeć więcej różnic pomiędzy dźwiękami, ich relacje względem siebie (np. określić interwał), a także wychwycić szczegóły ich brzmienia.

Organizm człowieka potrafi dostosować się do sytuacji, w której się znajduje. Podczas utraty jakiegoś zmysłu następuje zjawisko kompensacji, co oznacza zastępowanie tego uszkodzonego innym sprawnie funkcjonującym [8]. Tak więc od strony praktycznej zastąpienie zmysłów jest poniekąd możliwe. Podczas orientacji w przestrzeni głównie polegamy na zmysle wzroku. W przypadku osób niewidomych znacznie istotniejsze będą słuch i dotyk oraz w mniejszym stopniu węch. Nauka przemieszczania się polega na zapamiętywaniu kolejnych elementów na trasie do danego celu. Przechodząc przez kuchnię do salonu, oznaczamy kolejne obiekty A, B, C, D, które są charakterystyczne dla danego miejsca. Mogą to być np. lodówka, blat, mikrofalna na blacie, kran i na końcu drzwi prowadzące do kolejnej przestrzeni. Takie miejsce to tzw. mały obiekt i można je poznać głównie za pomocą zmysłu dotyku. Jeżeli natomiast dana osoba przemieszcza się w większej przestrzeni, takiej jak miasto, gdzie nie wszystkie elementy są w zasięgu rąk, to przydatnym zmysłem jest słuch, a umiejętność oceny, co można usłyszeć i jak daleko się znajduje, staje się bardzo ważna.

Podsumowując, trzeba podkreślić, że nie można zastąpić jednego zmysłu innym. Zmysły można jedynie doskonalić i wyostżać dzięki ciągłym treningom. W przypadku osób niewidomych rejon mózgu odbierający bodźce zmysłowe inne niż wzrokowe pracują intensywniej.

4. PROPONOWANA METODA TRENINGU ORIENTACJI PRZESTRZENNEJ – SŁUCHOWISKA BINAURALNE

Celem przewodnim słuchowisk jest stworzenie materiałów edukacyjnych służących do treningów percepcji słuchowej w orientacji przestrzennej. Ćwiczenia zawierają nagrania binauralne, by odsłuchiwane w nich krajobrazy dźwiękowe jak najmocniej nawiązywały do

naturalnego otoczenia, w którym były rejestrowane. Dana osoba, wykonując zadania, uczy się rozpoznawać przestrzeń na podstawie analizy i identyfikacji dźwięków zawartych w nagraniu. Wychwytywanie źródeł dźwięków i próba określenia, czym są w świecie rzeczywistym, uczy skupienia się na szczegółach. Natomiast zebranie tych informacji razem pomaga danej osobie stwierdzić, gdzie się w ogóle znajduje, czyli nazwać miejsce. Możliwe, że dokładna analiza przestrzeni z nagrania pomoże w rozpoznaniu miejsca podczas przemieszczania się wraz z mentorem po mieście lub innym obiekcie.

Dla osób z dysfunkcją wzroku informacje dostarczane za pomocą zmysłu słuchu mają szczególne znaczenie. Analiza dźwięków charakterystycznych dla danego obszaru jest pomocna w orientacji przestrzennej. W związku z tym nauka oceny krajobrazu dźwiękowego jest bardzo ważna [9].

Podczas nauki dzieci niewidome i słabowidzące wykonują trening zdolności kompensacyjnych, wykorzystując ćwiczenia dotykowe (np. rozróżnianie faktur obiektów) oraz słuchowe (rozróżnianie dźwięków w małej i dużej przestrzeni). W czasie zajęć zwraca się uwagę na różnice w odbiorze dźwięku w przestrzeni zamkniętej i otwartej, małej i dużej. Mentor przemieszcza się z uczniem i tłumaczy mu, co jest istotne [10]. Słuchowiska mają być dodatkową opcją edukacyjną. Służą do wykonania samodzielnej pracy w domu – w przestrzeni internetowej.

4.1. TWORZENIE MATERIAŁÓW EDUKACYJNYCH – NARZĘDZIA I PROGRAMY

Podstawowym elementem słuchowiska są nagrania binauralne. Zostały zarejestrowane za pomocą mikrofonów dousznych Soundman OKM II wpiętych przez wzmacniacz mikrofonowy do rejestratora Zoom H6.

Ważne jest zapewnienie zróżnicowanych krajobrazów dźwiękowych, aby ćwiczenia nie stały się monotonne dla ucznia, a jednocześnie sprzyjały rozwijaniu umiejętności percepcyjnych oraz koncentracji uwagi. Trzy pierwsze słuchowiska zawierają odgłosy:

- środowiska naturalnego – polskie morze;
- przestrzeni zurbanizowanej – Rynek Główny w Krakowie;
- obiektu gastronomicznego – kawiarnia.

W słuchowiskach zawarte są nagrania przedstawiające głosową treść zadań do wykonania. W projekcie wykorzystano mikrofon cyfrowy Novox NC-1. Następnie z nagrań usunięto szum w programie Audacity i poddano je ostatecznej edycji w programie Pro Tools.

4.2. BUDOWA SŁUCHOWISKA

Słuchowisko jest podzielone na trzy części. Pierwsza z nich ma za zadanie przygotować ucznia do pracy z materiałem. Na początku pojawia się informacja dotycząca rodzaju ćwiczenia, po której następuje komunikat z prośbą o założenie słuchawek. Ostatnim elementem jest test, w wyniku którego słuchacz może sprawdzić poprawność założenia słuchawek. Próba ta polega na odtworzeniu sygnału sinusoidalnego raz z prawej, raz z lewej strony wraz

z werbalnym oznaczeniem kierunku. Dzięki temu użytkownik ma pewność, że nie usłyszy obróconego obrazu dźwiękowego.

W kolejnych dwóch częściach znajdują się zadania do pracy z tym samym krajobrazem dźwiękowym. Najpierw pojawia się treść polecenia do wykonania, a następnie rozpoczyna się nagranie. Po każdym zadaniu wygłaszany jest komunikat z prośbą o zatrzymanie nagrania. Uczeń ma nieograniczony czas na wykonanie ćwiczenia. Na końcu słuchowiska są gratulacje w związku z ukończeniem zadań i informacja o analizie krajobrazu dźwiękowego zawartego w materiale ćwiczeniowym.

W pierwszym zadaniu słuchacz skupia się na rozpoznaniu i opisaniu przestrzeni na podstawie nagrania, które ją przedstawia. Pytania, na które ma udzielić odpowiedzi, są następujące:

- Gdzie się znajdujesz?
- Jest to przestrzeń otwarta czy zamknięta?
- Jaka w Twoim odczuciu jest przestrzeń? Mała, wielka, duża, ogromna?
- Jak myślisz, jaka może być to pora roku?
- Jeśli jesteś w stanie określić porę dnia, zapisz ją.
- Jak myślisz, gdzie się znajdujesz?

Pytanie dotyczące nazwania przestrzeni celowo pojawia się na początku i na końcu zadania. Najpierw sprawdzane jest pierwsze skojarzenie z usłyszonym dźwiękiem. Następnie słuchacz analizuje przestrzeń. Zadawane pytania pozwalają na naukę oceny przestrzeni na podstawie dźwięku, który jest odbierany przez aparat słuchowy. Na ostatnim etapie jest czas na wnioski i weryfikację, czy pierwsza ocena przestrzeni była prawidłowa.

W drugim zadaniu należy wypisać wszystkie pojedyncze dźwięki, które pojawiają się w nagraniu, nazwać je, a następnie opisać, odpowiadając na poniższe pytania:

- Z jakiego kierunku dociera dźwięk?
- W Twoim odczuciu źródło dźwięku jest blisko czy daleko?
- Jest to dźwięk ruchomy czy statyczny?
- Źródło dźwięku to ciało stałe, ciecz czy gaz?
- Czym jest źródło dźwięku? Rzeczą, rośliną, zwierzęciem, osobą czy elementem natury nieożywionej?

Ćwiczenie ma trzy cele:

1. Trening skupienia uwagi na szczegółach zawartych w otoczeniu.
2. Naukę nazw kierunków i cech źródeł dźwięku.
3. Uwrażliwienie na kolejne sygnały z otoczenia.

Połączenie tych dwóch zadań umożliwia kompleksową ocenę otoczenia – w pierwszym uczeń koncentruje się na poznaniu krajobrazu dźwiękowego w ujęciu ogólnym, a w drugim szczegółowo analizuje poszczególne dźwięki w nim zawartych.

4.3. SPOSÓB PRACY ZE SŁUCHOWISKAMI

Przygotowano dwie formy słuchowisk. Pierwsza z nich to pełne słuchowisko, czyli jeden długi film na platformie YouTube. Słuchacz pracuje z filmem i wykonuje ćwiczenia na kartce lub w osobnym pliku na komputerze. W opisie filmu są umieszczone zakładki do szybkiego

poruszania się po elementach słuchowiska. W przypadku pracy z małymi dziećmi z dysfunkcją wzroku jest to dobra opcja do treningu z rodzicem. Zamiast odtwarzać pytania z nagrania, może je przeczytać i dostosować do wieku dziecka. Druga forma to ćwiczenia zawarte w formularzu z odnośnikami do krótkich filmów, które składają się na całość słuchowiska. Ta opcja zawiera dodatkowy element w postaci ankiety ze zbiorem pytań – wraz ze zgodą na udzielenie odpowiedzi – dotyczących zmysłów i doświadczenia pracy z dźwiękiem. Pozwala to na tworzenie bazy danych do późniejszych analiz.

4.4. ANALIZA SŁUCHOWISKA

Dodatkiem do słuchowisk są ich analizy, które zawierają odpowiedzi na pytania zawarte w ćwiczeniach. Umożliwiają one uczniowi samodzielną weryfikację własnych odpowiedzi – bez konieczności konsultacji. W ten sam sposób co słuchowiska są one udostępnione w formie filmów na platformie YouTube. W opisie pliku zawarty jest link do dokumentu z opisową analizą oraz spis dźwięków zawartych w krajobrazie dźwiękowym wraz z zakładkami czasowymi, co umożliwia szybkie odnalezienie danego źródła dźwięku w nagraniu.

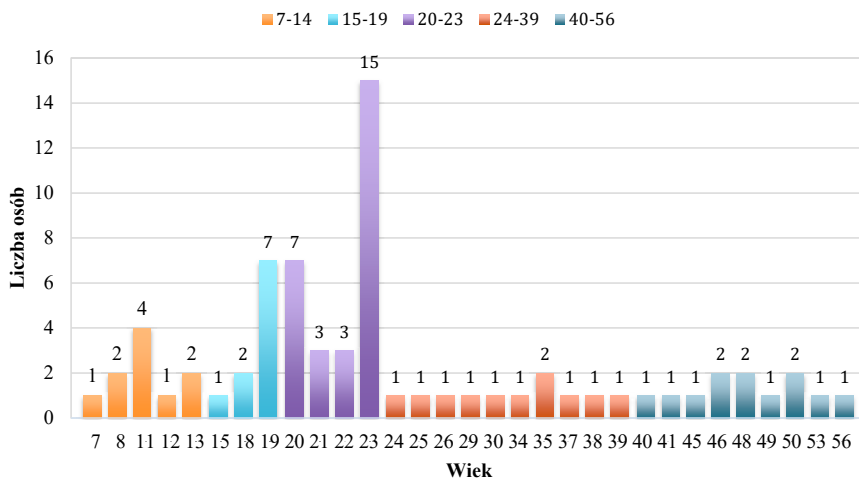
5. WYNIKI TESTÓW ODSŁUCHOWYCH

Z ankiety zamieszczonej w formularzu do słuchowiska nr 1 zebrano 71 odpowiedzi słuchaczy. Jest to mała grupa, jednak nawet w przypadku tak niewielkiego zbioru badanych można wykonać wstępną analizę i wyciągnąć pierwsze wnioski. Formularz zawiera polecenia ćwiczeń, miejsca na odpowiedzi do zadań oraz pytania dotyczące słuchacza.

Dane osobowe i pytania zawarte w ankiecie są następujące:

- rok urodzenia i płeć;
- liczba dysfunkcji sensorycznych;
- informacja o zmysłach, które nie funkcjonują prawidłowo;
- występowanie niepełnosprawności;
- doświadczenie w treningu słuchu, np. w ramach pracy muzyka lub akustyka;
- historia problemów ze wzrokiem;
- stan wzroku: niewidomy, brak problemów, krótkowzroczność, dalekowzroczność, osłabiona ostrość widzenia;
- samopoczucie w dniu wykonywania ćwiczenia.

Najmłodsza osoba pracująca ze słuchowiskiem miała 7 lat, a najstarsza 56 (rys. 2). Widoczne zwiększone zainteresowanie ćwiczeniami wśród młodzieży jest spowodowane udziałem studentów w badaniu. Wszystkie odpowiedzi na ćwiczenia zostały sprawdzone. W zadaniu drugim, polegającym na zapisaniu i nazwaniu wszystkich źródeł dźwięku w nagraniu, za poprawne odpowiedzi zostały uznane nazwy obiektów i zjawisk występujące w danym krajobrazie dźwiękowym lub brzmiące do nich podobnie. Następnie podsumowano, ile dźwięków usłyszał każdy z uczestników badania. Ankietowanych podzielono na pięć grup wiekowych: dzieci 7–14, młodzież szkół średnich i zawodowych 15–19, starsza młodzież 20–23 oraz dwie grupy dorosłych w wieku 24–39 i 40–56 lat (rys. 2).



Rys. 2. Wiek grupy badawczej

Obliczając średnią i modę (wartość, która występuje najczęściej w zbiorze danych) w każdej grupie wiekowej (rys. 3), można zaobserwować, że im osoba jest starsza, tym więcej usłyszała i nazwała dźwięków w odsłuchiwanym otoczeniu. Możliwe, że jest to efekt braku skupienia na zadaniu w młodszej grupie odbiorczej lub jeszcze niewyćwiczona umiejętność wyłapywania szczegółów. W związku z tym sensowniejsze wydaje się tworzenie krótszych słuchowisk, aby utrzymać skupienie na zadaniu i ułatwić pracę słuchaczom.



Rys. 3. Liczba usłyszanych dźwięków w zależności od wieku

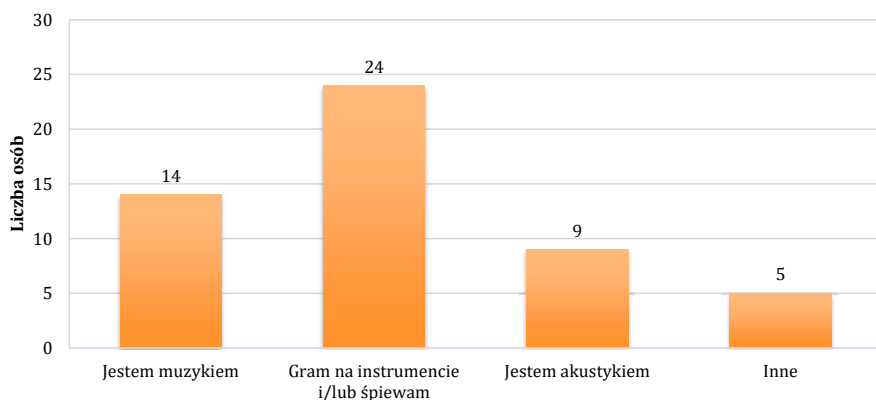
Tabela 1. Liczba usłyszanych dźwięków w zależności od treningu słuchu

Czy trenujesz swój słuch?	Liczba osób	Liczba usłyszanych dźwięków		
		Średnia	Średnia całkowita	Moda
Tak	29	3,62	4	3
Nie	42	3,29	3	2

Na podstawie analizy wyników ankiet przedstawionych w tabeli 1 można zauważyć, że osoby trenujące słuch rozpoznały poprawnie więcej dźwięków. Czy rodzaj treningu słuchu może mieć znaczenie? Na pytanie dotyczące rodzaju aktywności stymulującej percepcję słuchową badani mogli wybrać kilka odpowiedzi:

- Jestem muzykiem.
- Gram na instrumencie i/lub śpiewam.
- Jestem akustykiem.
- Inne.

Okazuje się, że większość badanych trenuje swój słuch, grając na instrumencie muzycznym lub śpiewając (rys. 4). Są to aż 24 osoby (wszystkich osób jest 29). Warto jednak zauważyć, że część badanych (16 osób) wybrała więcej niż jedną dziedzinę życia, która wpływa na stymulację ich zmysłu słuchu. Mając większą grupę badawczą i zadając bardziej szczegółowe pytania, można będzie sprawdzić zależności między liczbą zaobserwowanych dźwięków a rodzajem treningów słuchu.



Rys. 4. Liczba osób związanych z różnymi aktywnościami stymulującymi słuch

Wśród badanych nie pojawiły się osoby niewidome, dla których są przygotowywane słuchowiska. Natomiast prawie połowa badanych ma problemy ze wzrokiem – są to 33 osoby z 71 (tab. 2). Można zauważyć, że osoby z różnymi dysfunkcjami wzroku najczęściej wychwyciły w nagraniu cztery dźwięki, a osoby bez problemów ze wzrokiem dwa. Dane potwierdzają wspomniane we wstępie badania dotyczące adaptacji mózgu [7]. Wskutek osłabienia jednego zmysłu inny stał się częściej wykorzystywany, dzięki czemu osoby te wychwytyują więcej szczegółów w nagraniu. Niewątpliwie interesujące byłyby badania dotyczące osób, które miały problemy ze wzrokiem, ale dzięki rozwojowi medycyny już ich nie mają. Według wyników ankiet wyodrębniły mniej źródeł dźwięku niż pozostali, a dokładniej tylko jeden główny dźwięk opisujący krajobraz akustyczny zawarty w nagraniu (takiej odpowiedzi udzieliły dwie z czterech osób). Tworząc kolejne badania, warto pytać o liczbę dioptrii i szczegóły wady wzroku oraz o stan słuchu, by móc porównać wzajemne wpływy tych dwóch zmysłów.

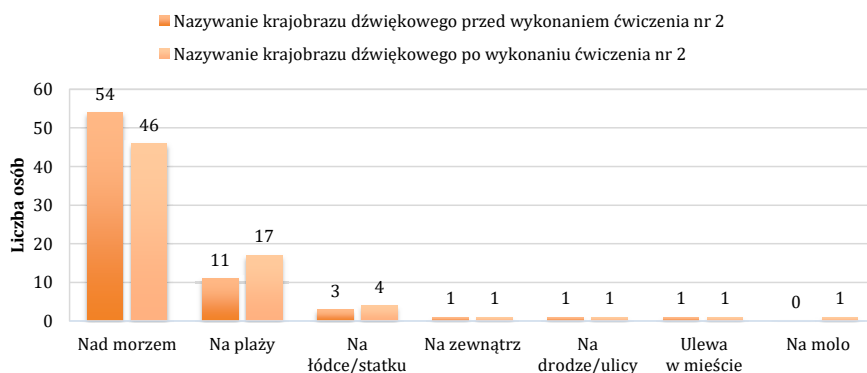
Tabela 2. Liczba usłyszanych dźwięków w zależności od problemów ze wzrokiem

Czy masz problemy ze wzrokiem?	Liczba osób	Liczba usłyszanych dźwięków		
		Średnia	Średnia całkowita	Moda
Tak	33	3,50	4	4
Nie	34	3,53	4	2
Kiedyś tak, ale teraz już nie	4	2,00	2	1

6. ODBIÓR BINAURALNYCH KRAJOBRAZÓW DŹWIĘKOWYCH PRZEZ SŁUCHACZY

W pierwszym ćwiczeniu słuchacze mieli za zadanie ogólnie ocenić krajobraz dźwiękowy, którym było w tym przypadku Morze Bałtyckie. Dźwięki zarejestrowano na plaży w Polsce. Odpowiedzi na to pytanie dotyczące lokalizacji, zadane na początku i końcu ćwiczenia, nieznacznie się różniły (rys. 5).

„Gdzie się znajdujesz?”

**Rys. 5.** Ocena krajobrazu dźwiękowego przez słuchaczy – nazwa przestrzeni

Szczegółowa analiza w przypadku części osób wpłynęła na decyzję o nazwaniu tego krajobrazu dźwiękowego. Uznając pierwsze dwie odpowiedzi za poprawne, można stwierdzić, że nagranie spełniło swój cel i ćwiczenie jest możliwe do wykonania. Dane na wykresie są uśrednieniem wszystkich uzyskanych odpowiedzi. By nie blokować kreatywności ucznia, pytanie miało charakter otwarty.

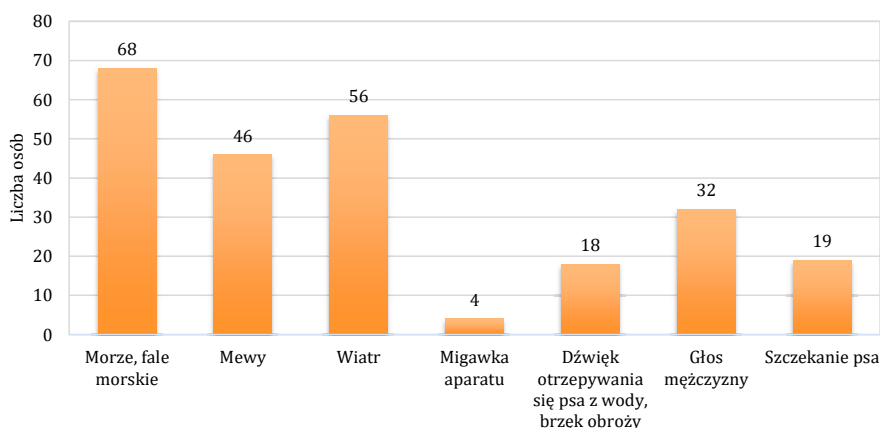
Odpowiedzi na inne pytania dotyczące opisu krajobrazu dźwiękowego z ćwiczenia pierwszego również są satysfakcjonujące. Cała grupa badawcza oceniła przestrzeń jako otwartą.

W trzecim pytaniu 66 osób oceniło krajobraz dźwiękowy jako naturę, jedna jako przestrzeń zurbanizowaną i cztery jako coś pomiędzy. W przypadku subiektywnej oceny wielkości 45 osób uznało ją za ogromną, 23 za dużą i 3 za średnią. Zaskakujące są odpowiedzi na pytania dodatkowe, gdzie 30 z 71 badanych dobrze określiło porę roku jako jesień, a 22 porę dnia jako popołudnie (nagranie wykonywane w październiku, około godziny 15.00).

W drugim zadaniu słuchacz skupia się na szczegółach krajobrazu dźwiękowego. Ma wychwycić jak najwięcej źródeł dźwięku i je nazwać. Dźwięki występujące w ćwiczeniu to:

- odgłosy morza i fal morskich,
- głosy mew,
- świst wiatru,
- dźwięk wydawany przez migawkę aparatu,
- dźwięk otrzepywania się psa z wody, brzęk obroży,
- głos mężczyzny,
- szczekanie psa.

Źródła dźwięków wskazane przez ankietowanych



Rys. 6. Porównanie odbioru źródeł dźwięków zawartych w słuchowisku nr 1

Dźwięk morza został wychwycony przez większość badanych (68 z 71). Dobra interpretacja definiuje poprawne rozpoznanie krajobrazu dźwiękowego. Opisy ankietowanych (rys. 6) to głównie następujące sformułowania: „morze”, „fale morskie”, „szum morza i fal”, „rozbijające się o brzeg fale”, ale również „padający deszcz”, „rzeka”, „woda”, „ocean”. Na drugim miejscu pojawia się wiatr (56 z 71 ankietowanych) określany czasami dokładnie tym słowem, a czasami jako „szum wiatru” lub „podmuch powietrza”. Jest dobrze słyszalny ze względu na czas rejestracji nagrania tuż przed burzą. Trzecim najczęściej typowanym źródłem dźwięku są mewy. Respondenci w opisie używali najczęściej następujących słów i sformułowań: „ptak”, „ptasi krzyk”, „krzyk mewy”, „mewa”, „pisk mewy”, „śpiew”, „odgłosy ptaków”, „ćwierkanie ptaków”. Dźwięk ten występuje w nagraniu dwukrotnie. Mniej niż połowa słuchaczy zarejestrowała scenę pod koniec nagrania. Słysząc w niej mężczyznę

wołającego psa, po czym zwierzę otrzepuje się z wody i szczekając, biegnie do właściciela. Głos był określany jako „rozmowy ludzi”, „krzyki dzieci”, „ludzie”, „człowiek”, „osoba”, „głos mężczyzny” (32 osoby z 71 badanych). Szczekanie psa opisano prawie jednogłośnie słowami „szczekanie psa” lub po prostu jako „pies” (19 osób z 71), a jego otrzepywanie się z wody jako różne zjawiska związane z dźwiękiem wydawanym przez poruszającą się wodę. Najbardziej unikatowy dźwięk został dostrzeżony przez cztery osoby, z czego trzy użyły sformułowania „migawka aparatu”, a jedna słowa „wiewiórka”.

Podsumowując wszystkie odpowiedzi, można zauważyć, że najlepiej słyszalne były dźwięki, które należą na stałe do badanej przestrzeni. Dźwięki sytuacyjne zostały wychwycone przez mniejszą część słuchaczy. Przy kolejnych słuchowiskach warto zapytać również o rodzaj wykorzystywanych słuchawek i głośność otoczenia, w którym uczeń wykonuje ćwiczenia, by upewnić się, że osoba badana ma właściwe środowisko do nauki.

7. PODSUMOWANIE I PLANY ROZWOJU

Słuchowiska są materiałami edukacyjnymi, które wykorzystują nagrania binauralne i mogą służyć do treningu orientacji przestrzennej. Są przeznaczone dla osób niewidomych, jednak może z nich korzystać każda osoba chcąca ćwiczyć swój słuch. Wstępne badania ankietowe pokazują, że zadania są zrozumiałe dla uczniów. Po zebraniu większej bazy odpowiedzi z testów słuchowych zawartych w ćwiczeniach, w połączeniu z informacją o zadeklarowanej przez badanych wadzie wzroku, mogą służyć do kolejnych badań, tym razem dotyczących korelacji między tymi zmysłami.

Na podstawie uzyskanych odpowiedzi można stwierdzić, że trening jest potrzebny nie tylko do nauki nazywania całej przestrzeni, ale również do poznania pojedynczych źródeł dźwięków i ich cech fizycznych.

W ramach rozwoju projektu planowane jest stworzenie większej liczby słuchowisk, które staną się zbiorem materiałów treningowych, ułożenie ćwiczeń do nauki zaimków przestrzennych, a także stworzenie strony z kontem ucznia. Wszystkie materiały edukacyjne są dostępne na platformie YouTube, na kanale o nazwie My Friend Sound [11].

LITERATURA

- [1] *Standard nauczania orientacji przestrzennej i mobilności*, Państwowy Fundusz Rehabilitacji Osób Niepełnosprawnych, Warszawa 2022, <https://firr.org.pl/wp-content/uploads/2022/04/STANDARD-NAUCZANIA-ORIENTACJI-PRZESTRZENNEJ-I-MOBILNOSCI.pdf> [dostęp: 5.01.2024].
- [2] Bernat S., *Kierunki kształtowania krajobrazów dźwiękowych*, [w:] *Dźwięk w krajobrazie jako przedmiot badań interdyscyplinarnych. Prace Komisji Krajobrazu Kulturowego*, tom XI, Instytut Nauk o Ziemi UMCS, Komisja Krajobrazu Kulturowego PTG, Lublin 2008, s. 100–121, <https://yadda.icm.edu.pl/baztech/element/bwmeta1.element.baztech-bc3e7873-2de5-4086-8159-5ab57871f47b> [dostęp: 7.03.2025].

- [3] Brixen E.B., *Binaural Recording Techniques*, <https://www.dpamicrophones.com/mic-university/audio-production/binaural-recording-techniques/> [dostęp: 10.02.2025].
- [4] Blauert J., *Spatial Hearing: The Psychophysics of Human Sound Localization*, MIT Press, Cambridge 1996.
- [5] Pawpaw, *What is the Head-Related Transfer Function*, <https://www.pawpaw.cn/en/blogs/2024-08-16-what-is-the-head-related-transfer-function/> [dostęp: 7.03.2025].
- [6] Rosenblum L.D., *See What I'm Saying: The Extraordinary Powers of Our Five Senses*, WW Norton & Company, New York 2010.
- [7] Bauer C.M., Hirsch G.V., Zajac L., Koo B.B., Collignon O., Merabet L.B., *Multimodal MR-imaging reveals large-scale structural and functional connectivity changes in profound early blindness*, PLoS One, vol. 12, no. 3, 2017, e0173064, <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0173064>.
- [8] L-instruktor.pl, „ZIELONY LISTEK”: Marek Dworzecki, *Niebezpieczeństwa wynikające z kompensacji zagrożeń*, <https://www.l-instruktor.pl/aktualnosci/marek-dworzecki-niebezpieczenstwa-wynikajace-z-kompensacji-zagro.html> [dostęp: 7.03.2025].
- [9] Wiciak J., Borkowski B., Czopek D., *A system for determination of areas hazardous for blind people using wave-vibration markers – final conclusions and technical application*, Acta Physica Polonica A. Acoustic and Biomedical Engineering, vol. 123, no. 6, 2013, s. 1101–1105, <http://przyrbwn.icm.edu.pl/APP/ABSTR/123/a123-6-29.html> [dostęp: 7.03.2025].
- [10] Papuda-Dolińska B., *Wspomaganie rozwoju poznawczego dzieci z dysfunkcją wzroku. Poradnik dla rodziców i nauczycieli*, Instytut Badań Edukacyjnych, Warszawa 2022, https://ibe.edu.pl/images/KAPP/NIEWIDOMI_I_SABOWIDZCY_Wspomaganie_rozwoju_poznawczego.pdf [dostęp: 7.03.2025].
- [11] My Friend Sound, <https://www.youtube.com/@MyFriendSound> [dostęp: 1.03.2025].

Ignacy Rapa*, Wiktoria Kuchta*, Jakub Miszczyński*

PROTOTYP JEDNOŁAŃCUCHOWEGO PRZENOŚNIKA KUBELKOWEGO O ZMIENNEJ GEOMETRII TRASY PRZEZNACZONEGO DO TRANSPORTU REGOLITU KSIĘŻYCOWEGO

Projekt dotyczy prototypu jednołańcuchowego przenośnika kubelkowego do transportu regolitu księżycowego. Urządzenie charakteryzuje się zmienną geometrią trasy dzięki możliwości osiowego skręcania łańcucha, co pozwala na pracę w trzech płaszczyznach. Przenośnik jest lekki, energooszczędny i zasilany energią słoneczną. Wyposażony został w punkt samozaładunkowy i system minimalizujący pylenie. Konstrukcja jest dostosowana do ekstremalnych warunków księżycowych: mikrogravitacji, braku atmosfery i dużej abrazyjności regolitu. W ramach prac wykonano badania laboratoryjne i stanowiskowe, analizując m.in. opory ruchu, energochłonność i stabilność prowadzenia łańcucha. Urządzenie wpisuje się w założenia ISRU (*in-situ resource utilization*), czyli koncepcji zakładającej lokalne wykorzystanie zasobów, i może znaleźć zastosowanie również na Ziemi.

PROTOTYPE OF A SINGLE-CHAIN BUCKET CONVEYOR WITH VARIABLE ROUTE GEOMETRY FOR LUNAR REGOLITH TRANSPORT

The project focuses on a prototype of a single-chain bucket conveyor designed for lunar regolith transport. The device features variable path geometry thanks to the ability to twist the chain axially, allowing it to operate in three planes. It is lightweight, energy-efficient, and powered by solar energy. The conveyor includes a self-loading point and a system that minimizes dust. Its design takes into account the Moon's extreme conditions: microgravity, lack of atmosphere, and high abrasiveness of the regolith. Laboratory and stand tests were carried out, analyzing movement resistance, energy consumption, and chain guiding stability. The device aligns with the ISRU concept – In-Situ Resource Utilization – and may also have applications on Earth.

* AGH Akademia Górniczo-Hutnicza, Wydział Inżynierii Mechanicznej i Robotyki, Koło Naukowe SpaceTeam AGH.

1. WPROWADZENIE, CEL I ZAKRES BADAŃ

ISRU (*in-situ resource utilization*) to koncepcja wykorzystywania lokalnych zasobów w eksploracji kosmosu, minimalizująca zależność od dostaw z Ziemi i obniżająca koszty misji. Obejmuje mapowanie zasobów, produkcję materiałów, inżynierię lądową, magazynowanie energii oraz produkcję i naprawy. Szczególne znaczenie ma wykorzystanie zasobów Księżyca, takich jak regolit czy lód, do budowy infrastruktury oraz pozyskiwania wodoru i tlenu na paliwo rakietowe. Wytwarzanie materiałów budowlanych z regolitu oraz wykorzystanie energii słonecznej są kluczowe dla przyszłych baz księżycowych. W ostatnich latach rozwijane są projekty w zakresie górnictwa kosmicznego, w których kluczową rolę odgrywa transport regolitu. Przenośniki są niezbędne, by wprowadzać w życie założenia ISRU, a przy ich projektowaniu trzeba uwzględniać ekstremalne warunki księżycowe. Niniejszy artykuł dotyczy analizy koncepcji i projektu przenośnika kubelkowego dostosowanego do pracy na Księżycu i jego roli we wdrażaniu ISRU. Projekt realizowany jest w ramach strategicznego Grantu Rektora AGH na rok 2024.

Celem prac było zaprojektowanie i wykonanie prototypu przenośnika kubelkowego do transportu regolitu, dostosowanego do specyficznej topografii Księżyca i ekstremalnych warunków środowiskowych. Urządzenie ma operować w trzech płaszczyznach, co decyduje o jego wszechstronności, oraz być zasilane energią słoneczną. Wyposażono je w system samonapędzający i mechanizmy odporne na pylenie regolitu.

Projekt obejmuje analizę literatury i koncepcji ISRU, warunków księżycowych oraz ich wpływu na projektowanie mechaniczne, charakterystyki regolitu księżycowego oraz systemu transportowego TOLRECON. W ramach projektu wykonano badania stanowiskowe poboru mocy testowego urządzenia oraz osiowego skręcenia łańcucha, a następnie zbudowano prototyp i przeprowadzono badania laboratoryjne. Na podstawie uzyskanych wyników sformułowano wnioski oraz sugestie dotyczące dalszego rozwoju przenośnika. Projekt ma na celu stworzenie efektywnego systemu transportowego dla przyszłych misji księżycowych, optymalizującego wykorzystanie lokalnych zasobów w zgodzie z założeniami ISRU.

2. ANALIZA WARUNKÓW PANUJĄCYCH NA KSIĘŻYCU I ICH WPŁYW NA PROJEKTOWANIE URZĄDZEŃ MECHANICZNYCH

Projektowanie urządzeń przeznaczonych do pracy na Księżycu wymaga dostosowania ich konstrukcji do ekstremalnych warunków środowiskowych. Należy uwzględnić takie czynniki jak temperatura, grawitacja, promieniowanie kosmiczne, brak atmosfery oraz ukształtowanie terenu. Temperatury na Księżycu wahają się od 123°C w dzień do -233°C w nocy, przy czym dzień i noc trwają po około 14 dni ziemskich, dlatego konieczne jest stosowanie materiałów o wysokiej stabilności termicznej oraz odpornych na rozszerzalność cieplną. Grawitacja Księżyca jest sześciokrotnie mniejsza niż ziemska, co wpływa na sposób transportu regolitu oraz wymusza dobór odpowiednich mechanizmów dostosowanych do zmniejszonego

przepływu materiału sypkiego. Brak atmosfery oznacza zwiększone tarcie w parach ciernych i konieczność stosowania różnych materiałów współpracujących, by uniknąć zjawiska zespałania elementów na zimno. Ekstremalne promieniowanie kosmiczne, wynikające z braku pola magnetycznego i atmosfery, może natomiast powodować degradację materiałów oraz negatywnie wpływać na elektronikę, dlatego istotne jest stosowanie ekranowania i warstw ochronnych, np. z regolitu, który może służyć jako izolacja. Wyzwaniem jest także duże zróżnicowanie powierzchni Księżyca, na której znajdują się kratery i wzgórza. Niezbędne są więc mobilne systemy transportowe zdolne do pracy w trudnym terenie.

Regolit to warstwa luźnego materiału skalnego pokrywająca powierzchnię Księżyca, która powstała w wyniku długotrwałego bombardowania mikrometeoritowego. Składa się głównie z drobnych cząstek skalnych, pyłu i fragmentów mineralnych charakteryzujących się wysoką abrazyjnością i nieregularnymi kształtami. Regolit jest silnie elektrostatyczny, dlatego przywiera w postaci pyłu do skafandrów astronautów i powierzchni urządzeń, co stanowi wyzwanie technologiczne. Pył zmniejsza wydajność układów optycznych i elektrycznych, a jego drobna struktura sprawia, że trudno zapewnić wystarczającą szczelność, by chronić ludzi i maszyny. Jednocześnie regolit jest cennym surowcem, który może być wykorzystywany do produkcji tlenu, metali oraz materiałów budowlanych dzięki procesom spiekania.

Uwzględnienie wszystkich wymienionych czynników przy projektowaniu księżycowych urządzeń transportowych pozwoli na ich efektywną i długotrwałą pracę, a także optymalizację procesów wydobywczych i budowlanych zgodnie z założeniami strategii ISRU.

3. UKŁAD ZASILANIA PRZENOŚNIKA

Warunki środowiskowe na Księżycu są niezwykle niesprzyjające, a temperatury ekstremalnie niskie lub wysokie, dlatego układy elektroniczne nie przetrwałyby na powierzchni naszego naturalnego satelity bez odpowiedniej ochrony. Zaprojektowany moduł zasilania zdolny jest do utrzymania stałej temperatury 290 K przez całą noc księżycową.

Proponowane rozwiązanie obejmuje:

- zamknięcie wszystkich mikrokontrolerów, kontrolerów, regulatorów i baterii w specjalnym pojemniku o objętości 1 m³;
- wypełnienie pojemnika powietrzem i zaizolowanie go grubą warstwą aerożelu, co zapewni skuteczną ochronę termiczną oraz łatwe rozprowadzanie i przewodzenie ciepła;
- zakopanie modułu w regolicie na głębokości około 0,3 m, gdzie stabilna temperatura wynosi około 255 K (badania sugerują, że na głębokości 1 m temperatura może osiągać nawet 300 K, co pozwoliłoby na skuteczniejsze zabezpieczenie elektroniki).

Wewnątrz modułu należy umieścić system monitorowania temperatury i podgrzewania elektroniki przez całą noc. Składa się on z mikrokontrolera, czujników temperatury, termorezystorów oraz wentylatorów. Kluczowym zagadnieniem jest więc ilość energii, jaką należy zgromadzić, aby elektronika mogła przetrwać noc księżycową.

Poniżej przedstawiono wzór, który pozwala taką wartość obliczyć:

$$Q = \frac{\lambda \cdot A \cdot \Delta T \cdot t}{d}$$

gdzie:

λ – stała cieplna aerożelu [W/(m·K)],

A – powierzchnia strat (zakładamy, że straty ciepła następują tylko przez górną część modułu) [m²],

ΔT – zmiana temperatury [K],

t – czas [h],

d – grubość materiału [m].

Po podstawieniu odpowiednich wartości do wzoru otrzymamy:

$$Q = \frac{0,014 \frac{\text{W}}{\text{m} \cdot \text{K}} \cdot 2 \text{ m}^2 \cdot 40 \text{ K} \cdot 354 \text{ h} \cdot 3600 \text{ s}}{0,1 \text{ m}} = 14,273 \text{ MJ}$$

Termorezystor o mocy 11,2 W powinien emitować odpowiednią ilość ciepła podczas pracy przez 354 h. Dodatkowo należy uwzględnić pobór przez wentylatory, czujniki temperatury oraz mikrokontroler, który działa przez 20 s co godzinę, a między okresami aktywności przechodzi w tryb uśpienia, w którym także pobiera moc. Na tej podstawie możemy obliczyć minimalną ilość energii, jaką musimy zgromadzić, aby zapewnić zarówno odpowiednią emisję ciepła, jak i zasilanie urządzeń sterujących przez całą noc księżycową.

Zakładamy, że baterie nie mogą rozładować się poniżej 30% oraz dodajemy dodatkowy margines błędu wynoszący 10%, a także przyjmujemy, że akumulatory mają napięcie 24 V, więc:

$$C = \left(\frac{Q}{U \cdot t} + W \right) \cdot \frac{100}{60}$$

$$C = \left(\frac{14,273 \text{ MJ}}{24 \text{ V} \cdot 3600} + 1,7 \text{ W} \right) \cdot \frac{100}{60} = 280 \text{ Ah}$$

gdzie:

W – moc [W],

U – napięcie [V].

Z obliczeń wynika, że do bezpiecznego przetrwania nocy na Księżycu potrzebny będzie ładunek elektryczny wynoszący około 280 Ah. Aby naładować baterie od 30% do 100% w ciągu 24 h, konieczne będą panele fotowoltaiczne o mocy wyjściowej około 320 W i napięciu 24 V.

Ponieważ warunki rzeczywiste zawsze odbiegają od idealnych, należy przewidywać, że pojawią się straty spowodowane poborem mocy przez każde z użytych urządzeń elektronicznych.

Założono, że utrata mocy wyniesie około 30 W. Oznacza to, że do normalnej pracy systemu przenośnika pozostaje około 250 W użytecznej mocy.

Na potrzeby projektu opracowano system zasilania składający się z dwóch paneli na ruchomym stelażu, na którym w przyszłości będzie można zamontować mechanizm śledzenia Słońca. Choć system ten nie jest przeznaczony do działania w warunkach księżycowych, stanowi bazę testową do dalszych badań i przyszłych projektów [1].

Układ może obracać się w zakresie 180° w płaszczyźnie poziomej, a kąt nachylenia w płaszczyźnie pionowej może wynosić od 90° do 30° . Pozwala to na ustawienie paneli pod optymalnym kątem względem promieni słonecznych. System składa się z drewnianej podstawy, w której umieszczono zestaw akumulatorów, układ sterowania oraz zintegrowany silnik serwowokowy iCS-1708 – 0.8 Nm Leadshine, odpowiadający za obrót paneli w płaszczyźnie poziomej. Na tej konstrukcji zamontowano aluminiowy stelaż, do którego przymocowano panele oraz siłowniki odpowiedzialne za ruch w płaszczyźnie pionowej [2, 3].

Panele zostały połączone szeregowo, ich łączna moc wynosi 180 W przy napięciu 24 V. Zasilanie zapewnia zestaw czterech akumulatorów o łącznej pojemności 40 Ah i napięciu 24 V. Nie są one ładowane bezpośrednio z paneli, lecz poprzez specjalny regulator AZO Digital MPPT 12/24, który zapewnia największą efektywność procesu [4].

Pomiar poboru prądu wykonany za pomocą amperomierza wbudowanego w regulator ładowania wykazał, że cały układ (łącznie z przenośnikiem) nie pobiera więcej niż 3,5 A. Podczas pierwszych testów ustalono również, że system generuje 4–5 A nawet w pochmurny dzień. Niezbędne są jednak dalsze badania, ponieważ tego rodzaju wstępne pomiary podczas testów konstrukcji nie są wystarczająco miarodajne. Można jednak stwierdzić, że układ jest w stanie pracować wyłącznie na energii słonecznej. Na kolejnych etapach planowane jest zwiększenie pojemności akumulatorów, dodanie ochrony termicznej oraz implementacja algorytmu śledzenia Słońca.

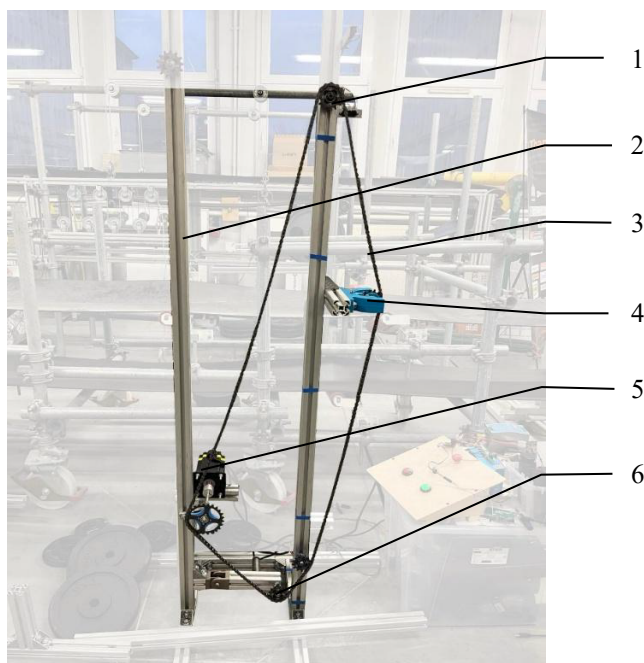
4. BADANIA LABORATORYJNE PRZENOŚNIKA KUBELKOWEGO Z CIĘGNIEM ŁAŃCUCHOWYM

Badania laboratoryjne wykonano w celu doboru parametrów geometrycznych przenośnika i analizy poboru mocy.

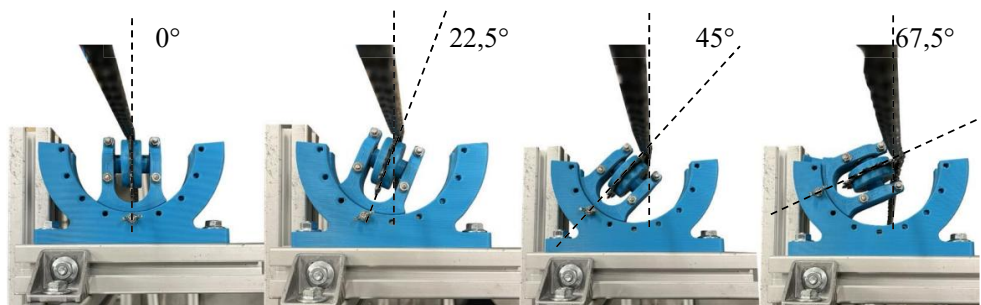
4.1. TESTY PROWADZENIA ŁAŃCUCHA

Badania mające na celu określenie wpływu osiowego skręcenia łańcucha na jego prowadzenie wykonano na stanowisku badawczym (rys. 1) składającym się z ramy wsporczej, zestawu kół łańcuchowych oraz mechanizmu umożliwiającego zmianę kąta skręcenia (rys. 2).

W przenośniku zamontowano ośmiorzędowy łańcuch Shimano, który badano, zadając różne kąty skręcenia: $0,0^\circ$, $22,5^\circ$, $45,0^\circ$, $67,5^\circ$ oraz $90,0^\circ$. Pomiarów dokonano przy dwóch prędkościach łańcucha – 20 obr/min ($0,104$ m/s) oraz 40 obr/min ($0,208$ m/s) – oraz przy dwóch wartościach siły napinającej, odpowiadających ciężarom 1,25 kg (5,6 N) i 10,00 kg (29,5 N).



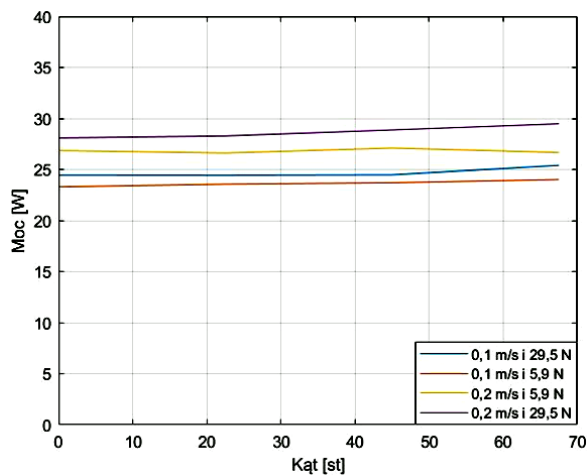
Rys. 1. Stanowisko do badań oporów skręcenia łańcucha:
1 – koła łańcuchowe; 2 – rama wsporcza; 3 – łańcuch rolkowy;
4 – mechanizm do zmiany kąta skręcenia łańcucha; 5 – silnik; 6 – mechanizm napinania łańcucha



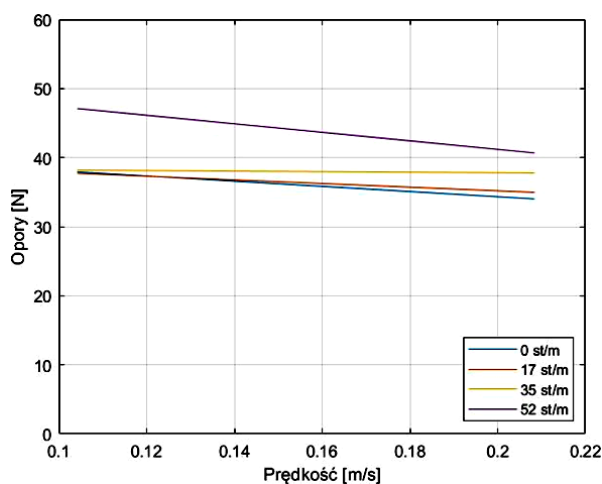
Rys. 2. Mechanizm do zmiany kąta skręcenia łańcucha

Za pomocą mikrokontrolera Arduino (próbki 5 razy na sekundę) rejestrowano natężenie prądu, a następnie wyliczano moc. Wyniki badań wskazują, że wraz ze wzrostem kąta skręcenia pobór mocy wzrasta o około 0,3% na każdy stopień (rys. 3) [5].

Zauważono także, że zwiększenie prędkości łańcucha skutkuje redukcją oporów – przy podwojeniu prędkości (z 0,1 m/s do 0,2 m/s) opory prowadzenia przy maksymalnym skręcenie spadają o 13,6% (rys. 4).



Rys. 3. Pobór mocy podczas skręcania łańcucha przy różnych prędkościach i siłach napinających łańcuch

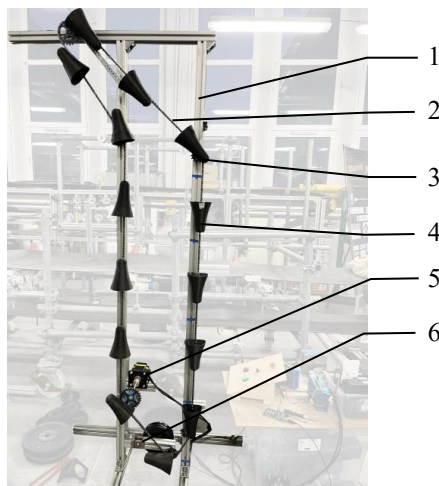


Rys. 4. Opory prowadzenia skręconego łańcucha w funkcji prędkości

Podczas badań stwierdzono również, że stabilne prowadzenie łańcucha jest możliwe jedynie do kąta $52^\circ/\text{m}$ – przy większym skreć łańcuch spada z prowadnicy.

4.2. BADANIA ENERGOCHŁONNOŚCI NAPĘDU

Celem tej serii badań była analiza zależności między poborem prądu (jednostkowo na metr wysokości przenośnika) a wydajnością masową transportu. Stanowisko badawcze przedstawiono na rysunku 5.



Rys. 5. Stanowisko badawcze do pomiaru energochłonności przenośnika kubelkowego:

- 1 – rama wsporcza; 2 – łańcuch rolkowy; 3 – koła łańcuchowe; 4 – kubelki;
5 – silnik; 6 – mechanizm napinający łańcuch

Testy przeprowadzono przy trzech prędkościach – 15 obr/min, 30 obr/min i 45 obr/min, co odpowiada prędkościom liniowym 0,078 m/s, 0,156 m/s oraz 0,234 m/s. Dodatkowo badano trzy poziomy załadowania kubelków: 50%, 100% i 150% masy nominalnej. Rejestrowano kilkusekundowe serie pomiarowe natężenia prądu, a na tej podstawie obliczano przebiegi mocy. Na rysunku 6 można zauważyć liniowy wzrost zużycia mocy jednostkowej wraz ze wzrostem wydajności przenośnika.

Na rysunku 7 zostały przedstawione siły oporów w funkcji prędkości transportu. Opory tarcia podczas przemieszczania łańcucha zależą od jego prędkości. Największą intensywność spadku oporów obserwuje się dla największego poziomu załadowania kubelków.

Wykorzystując dane zebrane podczas badań, można obliczyć wskaźnik energochłonności według wzoru:

$$w_e = \frac{N}{\dot{M} \cdot L}$$

gdzie:

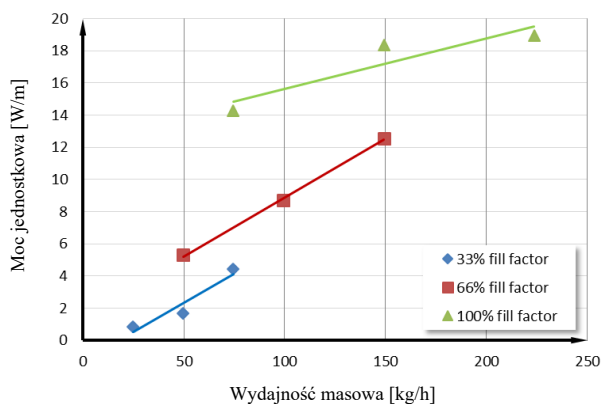
$\dot{M}$ – przepływ masy [kg/s],

N – moc [W],

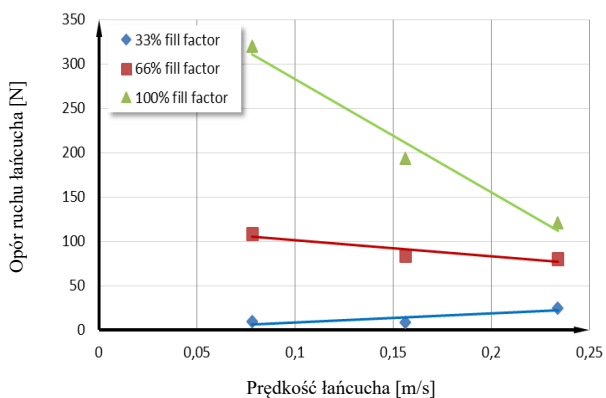
L – długość trasy transportu [m].

Wskaźnik energochłonności zdefiniowano jako wartość energii zużytej do transportu 1 kg materiału na odległość 1 m. Im mniejsza wartość wskaźnika, tym bardziej energooszczędne jest dane urządzenie.

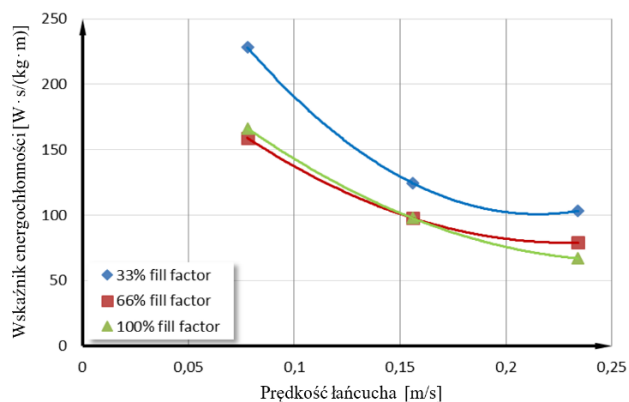
Wyniki badań przedstawione na rysunku 8 pokazują, że wskaźnik energochłonności przenośnika maleje wraz ze wzrostem prędkości kubelków i jest tym korzystniejszy, im większy jest stopień ich wypełnienia.



Rys. 6. Moc jednostkowa w funkcji wydajności dla różnego stopnia wypełnienia kubelków



Rys. 7. Opory ruchu łańcucha w funkcji prędkości jego przemieszczania



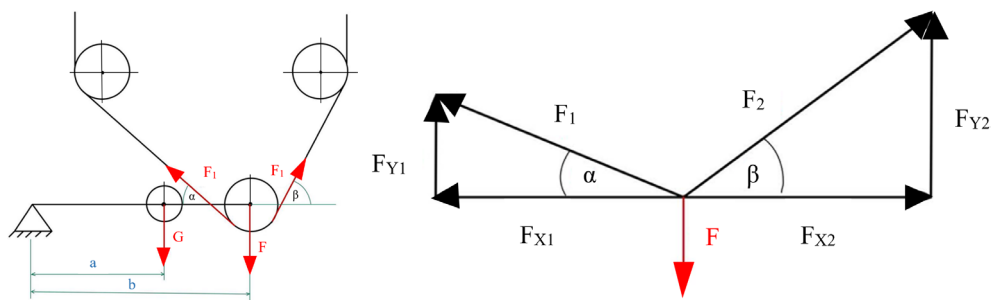
Rys. 8. Wskaźnik energochłonności w funkcji prędkości łańcucha

Wpływ siły napinającej łańcuch

W kolejnych badaniach oceniano, jak siła napinająca wpływa na opory ruchu łańcucha oraz pobór mocy układu. Na stanowisku zaprezentowanym na rysunku 9 zastosowano ciężarowy układ napinania, który pozwalał na regulację napięcia przez zmianę masy obciążnika i długości ramienia. Schemat rozkładu sił zaprezentowano na rysunku 10.



Rys. 9. Stanowisko do badań wpływu siły napinającej na opory ruchu łańcucha:
1 – koło zębate; 2 – profil aluminiowy; 3 – kubełek; 4 – napinacz grawitacyjny; 5 – koło zębate



Rys. 10. Rozkład sił w układzie napinania łańcucha

Wartości siły napinającej obliczano na podstawie równań:

$$G \cdot a = F \cdot b$$

$$F = G \cdot \frac{a}{b}$$

$$F = F_{y1} + F_{y2}$$

gdzie:

G – siła ciężkości obciążników [N],

a – odległość środka ciężkości obciążnika od osi obrotu ramienia [mm],

F – siła nacisku koła łańcuchowego na łańcuch [N],

b – odległość osi obrotu ramienia od wektora siły F [mm].

Założono, że siły oporów na kole łańcuchowym są małe, a więc pomijalne, dlatego można przyjąć, że siły F_1 i F_2 są równe.

Tabela 1. Zestawienie wyników badań wpływu siły napinającej na opory ruchu łańcucha

Siła F [N]	Obroty [obr/min]	Moc [W]
5,6	15	24,36
	30	26,50
	45	29,05
22,4	15	24,21
	30	27,84
	45	30,06
29,5	15	24,77
	30	27,05
	45	29,86

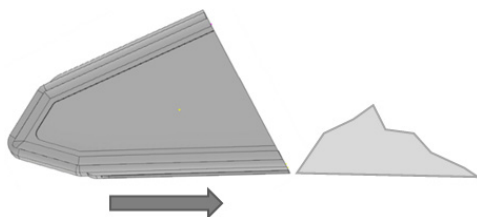
Wyniki pomiarów zestawione w tabeli 1 pokazują, że w zadanym zakresie sił napięcia zmiany poboru mocy są nieistotne, należy więc dobrać napięcie, które pozwala na najstabilniejsze prowadzenie łańcucha.

5. PROJEKT KONCEPCYJNY PRZENOŚNIKA KUBELKOWEGO

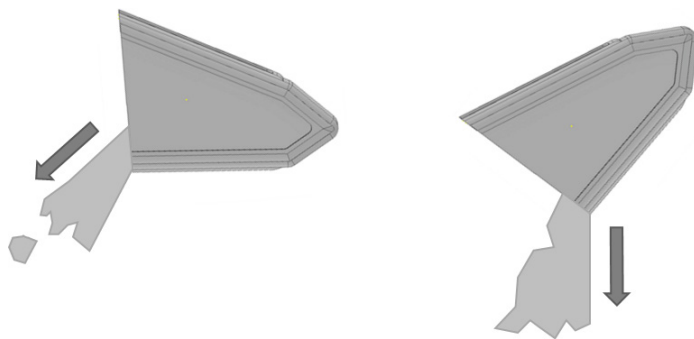
Projektowane urządzenie musi sprostać ekstremalnym warunkom księżycowym – niskiej grawitacji (0,16 g), skrajnym temperaturom (od +123°C do -233°C) oraz silnemu pyleniu regolitu, a jednocześnie restrykcyjnym wymogom dotyczącym masowych misji kosmicznych [6, 7]. Wszystko to sprawia, że konieczne jest zastosowanie konstrukcji o minimalnym stosunku masy do wydajności, elastyczności umożliwiającej pracę w różnych płaszczyznach czy konfiguracjach oraz niskiej energochłonności i samowystarczalności energetycznej.

Aby osiągnąć te cele, opracowano koncepcję jednołańcuchowego przenośnika kubelkowego o zmiennej geometrii trasy. Kluczowe było wykorzystanie łańcucha rolkowego zdolnego do skręcania osiowego, co pozwala na prowadzenie go po zakrzywionej ścieżce. Dzięki temu przenośnik może pokonywać zakręty w płaszczyźnie poziomej i pionowej, a więc transportować urobek po krętej trasie o zmiennej wysokości (np. od miejsca wydobywania na powierzchni do położonego wyżej punktu przeładunku). W dotychczas stosowanych rozwiązaniach łańcuch kubelkowy prowadzony był tylko w jednej płaszczyźnie – dodanie możliwości prowadzenia w różnych płaszczyznach stanowi istotną innowację zwiększającą wszechstronność urządzenia.

Dla sprawnej pracy projektowanego przenośnika istotna jest także budowa kubeków, do których nabierany byłby regolit. Ich asymetryczny kształt pozwala na efektywne naczepywanie materiału dzięki dłuższej ścianie, która podczas załadunku pozostaje równoległa do podłoża (rys. 11). Kubełek jest także szybciej opróżniany z transportowanego materiału, który zsypuje się po krótszej ścianie (rys. 12).

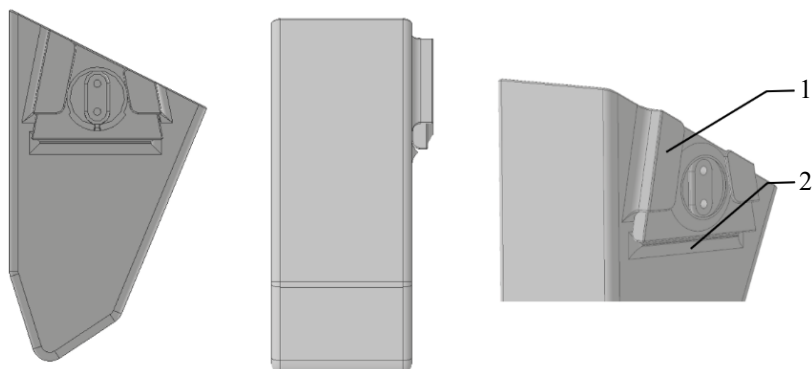


Rys. 11. Załadunek kubeków



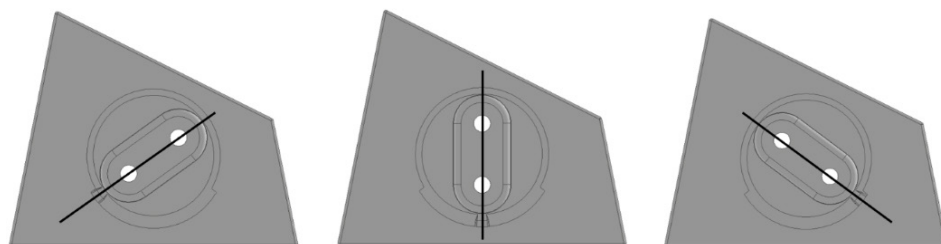
Rys. 12. Grawitacyjny rozładunek kubelka

Kubelki są mocowane do łańcucha za pomocą obrotowych uchwytów z wbudowanym łożyskiem – każdy może się obracać względem łańcucha (rys. 13). Takie rozwiązanie konstrukcyjne sprawia, że pod wpływem grawitacji kubełek utrzymuje odpowiednie położenie: jest skierowany otworem do góry i w czasie jazdy poziomej, i w czasie wznoszenia, co zapobiega wysypywaniu urobku. Łożysko, które w prototypie przenośnika wykorzystano w celu mocowania kubelka do łańcucha, umożliwia obrót w zakresie 120° podczas wysypywania materiału (rys. 14).



Rys. 13. Mocowanie łożyska do kubełka:

1 – prowadnica do mocowania łożyska w stelażu kubełka, 2 – próg blokujący łożysko w kubełku

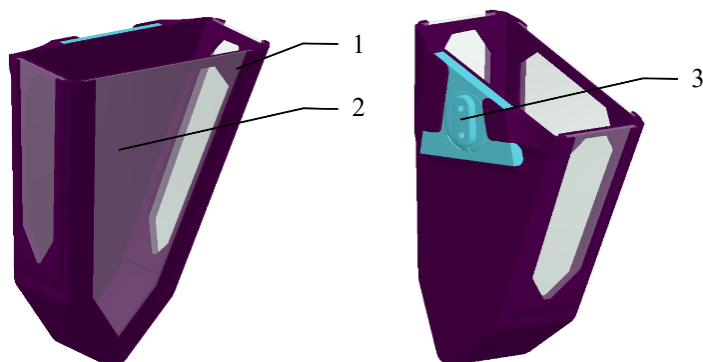


Rys. 14. Zakres obrotu łożyska łączącego kubełek z łańcuchem

W otworach montażowych łożyska mocującego kubełek do łańcucha rolkowego znajduje się sześć smarowniczek doprowadzających smar do całej powierzchni ślizgowej łożyska, które jest zakończone kołnierzem labiryntowym pełniącym funkcję uszczelnienia, drukowanym jako jeden element razem z dwoma pierścieniami. Do wykonania prototypu w technologii druku 3D wykorzystano filament PTEG z politetrafluoroetylenem, aby zapewnić lepszą współpracę powierzchni.

Aby zredukować masę kubełków oraz umożliwić łatwą wymianę elementów najbardziej narażonych na uszkodzenia, zdecydowano się na zaprojektowanie wymiennych ścianek. Taka modyfikacja pozwala na zmniejszenie masy sprzętu transportowanego na Księżyc (a tym samym kosztów misji), zwłaszcza jeśli możliwe byłoby wykonanie ścianek z dostępnych na miejscu materiałów (takich jak spiekany regolit księżycowy), co ułatwia nieskomplikowany kształt ścianek. Dodatkowo kubełki są delikatnie zwężane na dnie w taki sposób, aby można je było włożyć jeden w drugi, dzięki czemu ich transport i przechowywanie są prostsze.

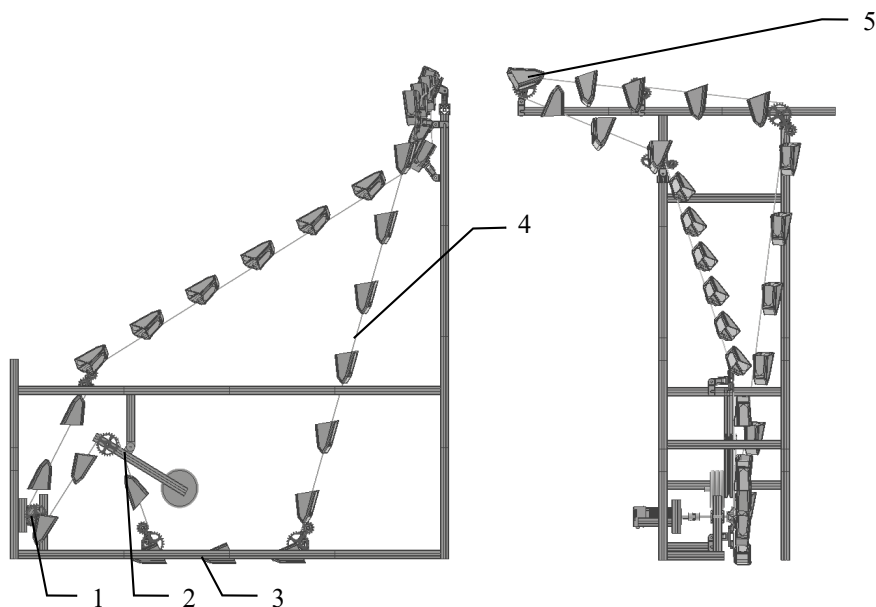
Kubełki (rys. 15) zostały wykonane ze stelaża (1) wydrukowanego jako jeden element w technologii FDM z PLA. Ścianki (2) wycięto z blachy aluminiowej o grubości 2 mm i wsunięto w prowadnice stelaża. Jako osobny element wydrukowano łożysko (3), które przykręcono do łańcucha, a następnie wsunięto w trapezową, zwężającą się prowadnicę.



Rys. 15. Budowa kubelka. Objaśnienia w tekście

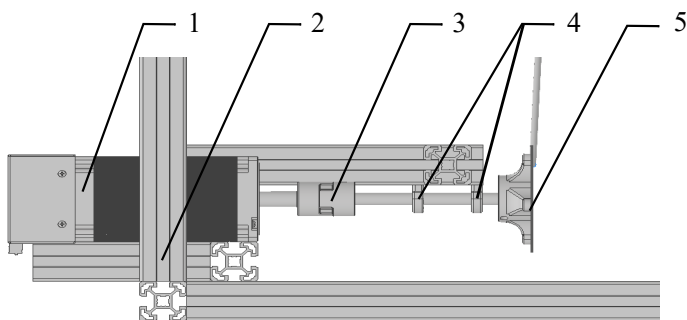
Wykonany prototyp ma 2 m długości i 2,5 m wysokości. Funkcję cięgna pełni ośmiorzędowy, rolkowy łańcuch rowerowy Shimano ACNHG40114. W przypadku urządzenia wysyłanego na Księżyc bardzo istotne jest dobranie cięgna wykonanego z różnych materiałów, ponieważ w innym przypadku elementy bezpośrednio współpracujące mogą się zespawać na zimno.

Łańcuch wraz z kubkami (rys. 16) napędzany przez umieszczony po lewej stronie przenośnika silnik (1) obraca się wokół osi o 90° od punktu samozaładunku (3) do miejsca rozładunku (5) na wysokości 2,5 m, przy czym jest skręcany na odcinku o długości około 2 m (4).



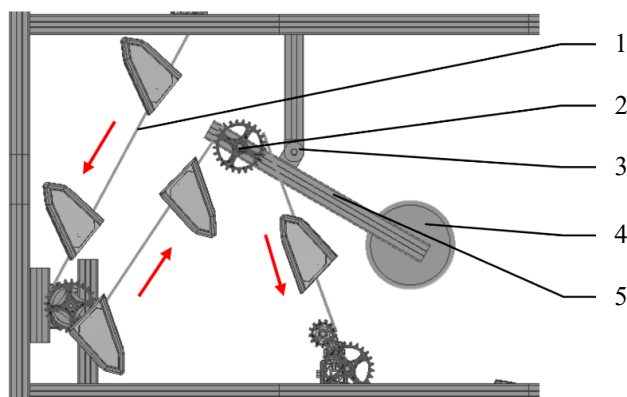
Rys. 16. Trasa przenośnika: 1 – silnik; 2 – napinacz; 3 – punkt załadunku kubelków; 4 – najdłuższy odcinek trasy łańcucha; 5 – punkt rozładunku kubelków

Układ napędowy (rys. 17) prototypowego przenośnika znajduje się po jego lewej stronie w strefie czystej, gdzie kubelki przejeżdżają bez załadowanego pyłącego materiału przez łańcuchowe koło napędowe. Trasa łańcucha prowadzona jest wokół koła napędowego tak, aby osiągnąć możliwie największy kąt opasania i zmniejszyć naprężenia na zębach koła oraz polepszyć stabilność prowadzenia łańcucha. Silnik o mocy 90 W z reduktorem (1) o współczynniku redukcji 1 : 50 przymocowany jest do stelaża przenośnika (2) i sprzęgłem kłowym (3) połączony z kołem łańcuchowym (5) umieszczonym na wale napędowym osadzonym na dwóch łożyskach kulkowych (4). Docelowo silnik będzie zasilany z akumulatorów ładowanych przez panele fotowoltaiczne w celu uzyskania całkowitej niezależności energetycznej. Maksymalna prędkość silnika to 27 obr/min, a maksymalna prędkość liniowa jadącego z kubelkami łańcucha wynosi 14 cm/s.



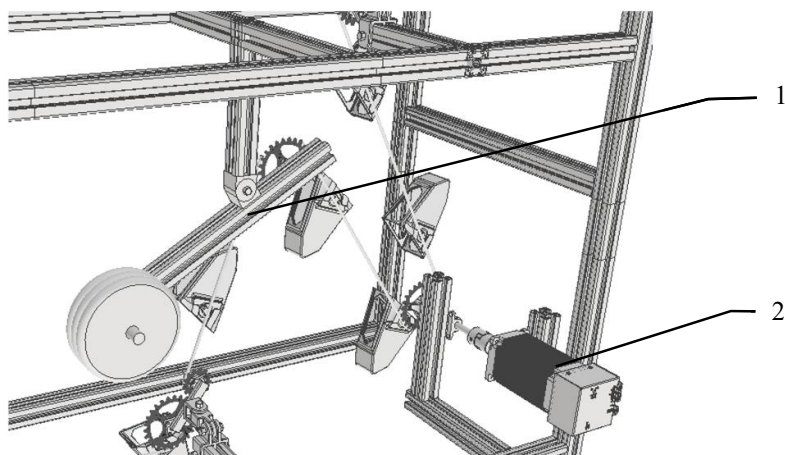
Rys. 17. Układ napędowy. Objasnienia w tekście

Po opuszczeniu części napędowej łańcuch wchodzi na mechanizm napinający (rys. 18) składający się z przegubu, na którego jednym ramieniu znajdują się obciążniki, a na drugim koło łańcuchowe bezpośrednio napinające ciągną. Siłę napięcia można regulować, zmieniając masę obciążników i długość ramienia, na którym są one zamocowane (rys. 19).



Rys. 18. Grawitacyjny mechanizm napinający łańcuch:

1 – ciągną napinające; 2 – koło łańcuchowe; 3 – przegub; 4 – obciążenie; 5 – profil aluminiowy



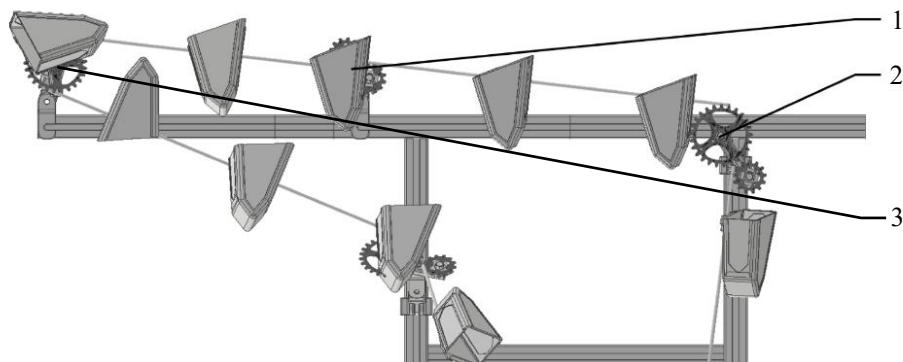
Rys. 19. Napinacz z obciążnikami: 1 – układ napinania łańcucha; 2 – układ napędowy

W przypadku zastosowania opisanego rozwiązania na Księżycu, aby wyeliminować konieczność transportu obciążników, można napełnić je regolitem. Ich masa musi być około sześć razy większa niż na Ziemi, jednak gdy jako wypełnienie wykorzystuje się materiał łatwo dostępny na miejscu, jego duży ciężar nie utrudnia transportu z Ziemi, a pozwala na dodatkowe dociążenie i stabilizację konstrukcji.

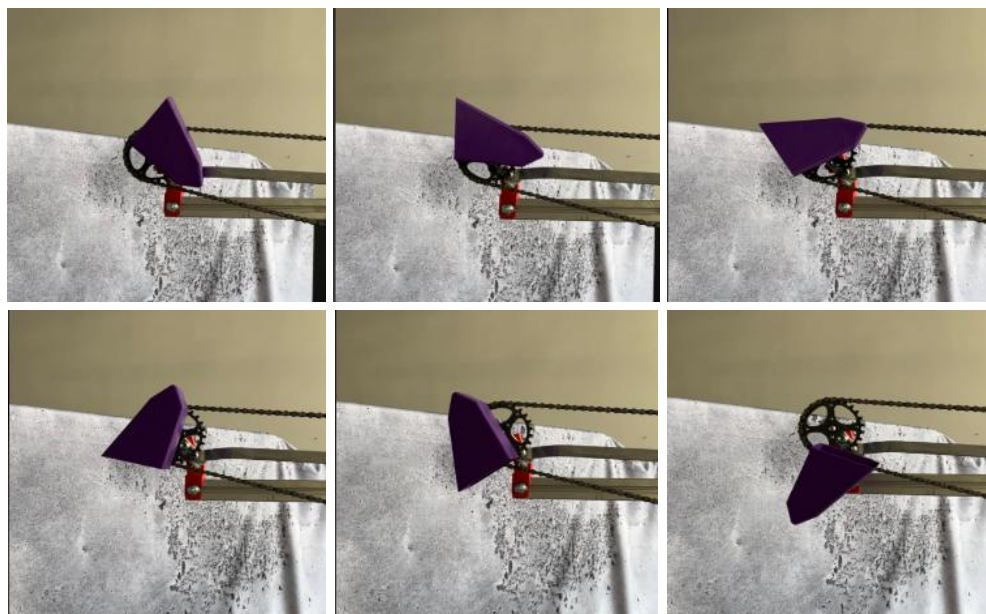
Za napinaczem znajduje się punkt samozaładowniczy przedstawiony na rysunku 16 (3). Mocowane obrotowo do łańcucha kubelki ustawiają się najdłuższą ścianką równolegle względem podłoża i są do niego dociskane, dzięki czemu naczepują materiał. Następnie łańcuch przechodzi przez najdłuższy prosty odcinek trasy przenośnika (numer 4 na rys. 16) i jest skreśniony osiowo o 90° na długości około 2 m. Dalej znajduje się przegubowy uchwyt (rys. 20) z dwoma kołami łańcuchowymi – dużym prowadzącym oraz małym trzymającym skreślony łańcuch i zapobiegającym jego spadaniu – który jest pochylony względem płaszczyzny pionowej stelaża w celu lepszego podtrzymania łańcucha. Ten właśnie uchwyt przenosi największe obciążenia, ciągnąc łańcuch z zapełnionymi transportowanym materiałem kubekami na długim i prawie pionowym odcinku w górę.

Na kolejnym fragmencie trasy kubelki są transportowane pod kątem około 5° aż do wysypu. Ważną rolę odgrywają tu obrotowe mocowania kubków do łańcucha za pomocą łożysk ślizgowych, dzięki którym możliwy jest transport poziomy bez wysypywania materiału, ponieważ kubelki obracają się pod wpływem grawitacji. W połowie odcinka znajduje się dodatkowe mocowanie (rys. 20) z dwoma małymi kołami łańcuchowymi podtrzymującymi opadający łańcuch, którego napięcie na tym fragmencie jest niskie, a transportowana masa duża. Ułatwia to wchodzenie łańcucha na kolejne koło przy wysypie.

Zakres obrotu łożysk przy kubkach jest ograniczony do 120° , co pozwala na grawitacyjne utrzymywanie kubków w pozycji pionowej, ponieważ ich środek ciężkości znajduje się pod łożyskiem, a jednocześnie na całkowity obrót kubków w punkcie wysypu w celu opróżnienia z materiału w wyznaczonym miejscu (rys. 21).



Rys. 20. Transport poziomy materiału:
1 – mocowanie łańcucha; 2 – dwa koła łańcuchowe; 3 – koło łańcuchowe



Rys. 21. Obrót kubelka na wysypie

Łańcuch z miejsca wysypu zawraca do koła napędowego, przechodząc przez kolejne dwie pary kół łańcuchowych. Na pierwszym odcinku zawraca po skosie, aby umożliwić wysypanie resztek materiału do zbiornika. Przy prowadzeniu łańcucha może on być skręcany, ale należy zapobiegać jego zginaniu w płaszczyźnie płytek.

Gotowy prototyp przenośnika został zaprezentowany na rysunku 22. Opisaną trasę zaproponowano w celu prezentacji możliwości łańcucha rołkowego i elementów prowadzących, ale można ją kształtować całkowicie dowolnie w zależności od potrzeb.



Rys. 22. Prototyp przenośnika

6. PODSUMOWANIE

Jednołańcuchowy przenośnik kbelkowy o zmiennej geometrii trasy został zaprojektowany z myślą o zastosowaniu w przemyśle wydobywczym na Księżycu. Prototyp powstał w ramach Grantu Rektora AGH oraz działalności koła naukowego SpaceTeam AGH w 2024 roku. Dzięki modułowej konstrukcji, możliwości zmiany geometrii trasy w trzech wymiarach przez skręcanie łańcucha oraz przystosowaniu do ekstremalnych warunków przenośnik doskonale wpisuje się w założenia koncepcji *in-situ resource utilization* (ISRU), kluczowej dla przyszłych misji kosmicznych. Praca opiera się na szczegółowej analizie specyficznych potrzeb przemysłu kosmicznego, w szczególności związanych z wydobywaniem na Księżycu. Wyzwania takie jak trudne warunki środowiskowe, zmienne zapotrzebowanie na surowce oraz konieczność minimalizacji ilości materiałów transportowanych z Ziemi determinują założenia projektowe i wymagania stawiane urządzeniom wykorzystywanym w przestrzeni kosmicznej. Opracowany przenośnik może być dostosowywany do nowych zadań po zakończeniu pierwotnej misji. Takie podejście wpisuje się w strategię ISRU, koncentrującą się na ponownym wykorzystaniu dostępnych surowców i urządzeń, co ogranicza generowanie odpadów kosmicznych.

Dalszy rozwój projektu powinien obejmować dobór odpowiedniego systemu załadunku, który zapewni płynne pobieranie materiału bez negatywnego wpływu na parametry pracy urządzenia. Kolejnym istotnym kierunkiem badań jest optymalizacja ciągu transportowego. Wprowadzenie łańcucha ogniwowego mogłoby poprawić zdolność skrętu oraz stabilność prowadzenia kubelków, zwiększając tym samym efektywność całego systemu. Dzięki zmiennej geometrii, kompaktowym wymiarom i niewielkiej masie przenośnik jest wszechstronnym urządzeniem, które może również znaleźć zastosowanie w przemyśle na Ziemi, szczególnie w zakresie transportu materiałów sypkich.

LITERATURA

- [1] Tooles.pl, *Zestaw solarny fotowoltaiczny 180 W 12 V (Panel solarny 180 W, Regulator napięcia 10 A) VOLT POLSKA*, https://tooles.pl/pl/products/zestaw-solarny-fotowoltaiczny-180w-12v-panel-solarny-180w-regulator-napiecia-10a-volt-polska-1733?utm_source=google&utm_medium=cpc&utm_id=311965205&utm_term=&utm_content=192584887128&gad_source=1&gad_campaignid=311965205&gclid=CjwK-CAjw3_PCBhA2EiwAKH_j4rR9DKIIhWF9FIvFnoAnz-D71zTnuB3htEQMf03wUy-BAImuLu6gaMxoCCIUQAvD_BwE [dostęp: 15.06.2024].
- [2] Botland, *Silownik elektryczny LA10 150N 40 mm/s 12V – wysuw 30 cm*, <https://botland.com.pl/silowniki-liniowe/17097-silownik-elektryczny-la10-150n-40mms-12v-wysuw-30cm-5904422326852.html> [dostęp: 15.06.2024].
- [3] EBMiA.pl, *Zintegrowany silnik serwokrokovy iCS-1708 – 0.8 Nm Leadshine*, <https://www.ebmia.pl/zintegrowane-serwonapedy/260938-zintegrowany-silnik-serwokrokovy-ics-1708-08nm-leadshine.html> [dostęp: 15.06.2024].
- [4] Botland, *Solarny regulator ładowania AZO Digital MPPT 12/24 – 20 A z wyświetlaczem LCD*, <https://botland.com.pl/akcesoria-do-paneli-slonecznych/12981-solarny-regulator-ladowania-azo-digital-mppt-1224-20a-z-wyswietlaczem-lcd-5905279203891.html> [dostęp: 15.06.2024].
- [5] Botland, *Arduino Uno Rev3 – A000066*, <https://botland.com.pl/arduino-seria-podstawowa-oryginalne-plytki/1060-arduino-uno-rev3-a000066-7630049200050.html> [dostęp: 15.06.2024].
- [6] Reitz G., Berger T., Matthiae D., *Radiation exposure in the Moon environment*, Planetary and Space Science, vol. 74, iss. 1, 2012, s. 78–83. <https://doi.org/10.1016/j.pss.2012.07.014>.
- [7] Sanders G.B., Larson W.E., *Integration of in-situ resource utilization into lunar/Mars exploration through field analogs*, Advances in Space Research, vol. 47, iss. 1, 2011, s. 20–29, <https://doi.org/10.1016/j.asr.2010.08.020>.

AI IN HIGHER EDUCATION: ACADEMIC SUPPORT OR ETHICAL DILEMMA? ANALYZING STUDENT USE OF GPT MODELS DURING EXAMS

With the increasing integration of artificial intelligence tools, such as GPT models, in higher education, their impact on learning processes and academic integrity has become a subject of growing research interest. This article presents a qualitative analysis of students' responses to open-ended questions from a broader survey on the use of GPT models specifically during exams, focusing on their declarations regarding AI use and the ways in which they utilized these tools in exam settings. The findings reveal that while some students perceive AI as a learning aid that reduces stress, others exploit it to bypass traditional assessment methods, particularly in subjects they deem less valuable. The analysis underscores the ethically ambiguous role of AI in education, highlighting the need to adapt evaluation strategies, and address the challenges posed by the growing presence of AI (not only) in academia. Future research should focus on disciplinary differences, institutional policies, and the long-term cognitive effects of AI use by students.

AI W EDUKACJI WYŻSZEJ: WSPARCIE AKADEMICKIE CZY DYLEMAT ETYCZNY? ANALIZA KORZYSTANIA Z MODELI GPT PRZEZ STUDENTÓW PODCZAS EGZAMINÓW

Wraz z coraz szerszym wykorzystaniem narzędzi sztucznej inteligencji, takich jak modele GPT, w szkolnictwie wyższym ich wpływ na procesy uczenia się i uczciwość akademicką budzi rosnące zainteresowanie badawcze. Niniejszy artykuł przedstawia analizę jakościową odpowiedzi studentów na pytania otwarte zawarte w szerszej ankiecie dotyczącej wykorzystania modeli GPT podczas egzaminów, koncentrując się na deklaracjach studentów dotyczących użycia AI oraz sposobach korzystania z tych narzędzi w trakcie egzaminów. Wyniki wskazują, że podczas gdy niektórzy studenci postrzegają AI jako narzędzie wspierające naukę i redukujące stres, inni wykorzystują je do omijania reguł tradycyjnych metod oceniania, szczególnie w przypadku przedmiotów uznawanych za mniej wartościowe. Na podstawie analizy można stwierdzić, że rola AI w edukacji jest etycznie niejednoznaczna, co wskazuje na potrzebę dostosowywania strategii oceniania oraz konieczność mierzenia się z wyzwaniami wynikającymi z rosnącą obecnością AI w szkolnictwie wyższym (i nie tylko). Przyszłe badania powinny koncentrować się na różnicach między dziedzinami nauki, politykach instytucjonalnych oraz długoterminowych skutkach kognitywnych stosowania AI przez studentów.

* AGH University of Krakow, Faculty of Humanities, Student Scientific Circle SocTech.

1. INTRODUCTION

1.1. AI DEVELOPMENT AND ITS HISTORICAL MILESTONES

The origins of artificial intelligence (AI) can be traced back to the 1940s, when Warren McCulloch and Walter Pitts [1] proposed a model of artificial neurons, drawing on neuroscience, propositional logic, and Turing's computation theory [2, p. 16]. This foundational work laid the groundwork for the development of intelligent machines, further advanced by Alan Turing's seminal paper "Computing Machinery and Intelligence" [3], which introduced the Turing Test – a method for evaluating whether a machine can exhibit human-like intelligence by successfully deceiving a human judge in a text-based interaction.

A major turning point came in the summer of 1956, when a group of pioneering scientists, including Marvin Minsky, Claude Shannon, Herbert Simon, and John Nash, gathered at Dartmouth College in Hanover, New Hampshire, to establish AI as a scientific discipline [2, p. 17]. Their efforts shaped the trajectory of AI research over the next two decades, influencing institutions such as MIT, Carnegie Mellon University (CMU), Stanford, and IBM [2, p. 17]. By the mid-2000s, accumulating successes had demonstrated a crucial lesson: data could surpass theoretical models, leading to a new generation of intelligent machines powered by statistical learning algorithms and vast amounts of data [4]. This shift marked the beginning of modern AI, where machine learning models became increasingly sophisticated, paving the way for the AI-driven innovations of today.

1.2. THE EMERGENCE OF GENERATIVE AI AND CHATGPT

Artificial intelligence (AI) is not a single technology but rather a broad field encompassing machine learning, natural language processing, data mining, neural networks, and algorithms [5]. Within this domain, generative AI represents a category of models designed to produce new data by recognizing and replicating patterns found in existing dataset [6]. While AI research has been ongoing for several decades, ChatGPT is regarded as a breakthrough model in natural language processing (NLP) due to its ability to generate text that is both grammatically and semantically accurate [7]. Trained on an extensive corpus of textual data and fine-tuned for conversational interactions, ChatGPT produces responses that closely resemble human communication, allowing it to process, retrieve, and interpret complex information [6, p. 122].

1.3. THE GROWING INFLUENCE OF AI IN SOCIETY AND EDUCATION

The rapid expansion of AI development and investment underscores the growing significance of these technologies, as they continue to reshape industries, education, and daily life. Recognizing the potential of AI, major corporations are making unprecedented investments in its development. For instance, Google has announced a \$75 billion investment in artificial intelligence initiatives for 2025, highlighting the increasing financial commitment to AI infrastructure and innovation [8]. In a collaborative effort, OpenAI, SoftBank, Oracle, and

MGX have launched The Stargate Project, a joint venture aiming to invest up to \$500 billion in AI infrastructure by 2029 [9].

Parallel to these investments, the scientific and academic communities have demonstrated extraordinary interest in AI research, particularly in ChatGPT and generative AI models. As per Google Scholar, by March 2023, more than 3,000 articles, reports, and media pieces had been published across journals, conferences, newspapers, blogs, and other sources [6]. The number of scholarly articles on ChatGPT remained relatively low until 2022, followed by a dramatic surge in 2023, reflecting the growing impact and widespread discussion of generative AI in research and various fields [6]. While these investments and research efforts highlight AI's transformative potential, they also bring pressing ethical challenges that require careful scrutiny.

1.4. ETHICAL AND SOCIETAL RISKS OF GPT MODELS

One of the most significant concerns surrounding AI in education and beyond is the lack of transparency, accountability, and bias in AI decision-making. This raises issues related to academic dishonesty, privacy breaches, environmental impact, and cultural homogenization [10]. Additionally, the dominance of Western-centric, English-language AI models exacerbates inequities in global knowledge access, disproportionately benefiting native English speakers while marginalizing non-Western perspectives [10]. Moreover, GPT models inherit biases from the vast datasets they are trained on, leading to the reinforcement of harmful stereotypes and misinformation [6]. The Mitra et al. [11] study categorizes the risks of generative AI in information access, highlighting concerns such as content pollution, the “game of telephone” effect, search engine manipulation, bias amplification, and the pollution of research artifacts. These risks illustrate how AI-generated content can degrade information quality, spread misleading narratives, and weaken critical discourse in research and education.

To mitigate this issue, OpenAI has implemented training mechanisms that allow GPT models to identify and filter out unethical content, a process that required extensive manual data labeling to recognize and mitigate bias. However, the ethical concerns surrounding AI development extend beyond content moderation, as the labor practices involved in AI training have drawn significant criticism. For instance, Kenyan workers tasked with labeling data for OpenAI were reportedly paid less than \$2 per day, an amount significantly below the minimum hourly wage for a receptionist in Kenya [12]. This highlights the hidden ethical costs of AI development, raising questions about fair labor practices, corporate responsibility, and the socio-economic implications of AI-driven automation.

As AI technologies, particularly GPT models, become more deeply embedded in academic settings, concerns about their role in education, student learning behaviors, and academic integrity continue to grow [7, 13]. Research indicates that while AI tools offer opportunities for personalized learning and academic support, they also present challenges related to plagiarism, cheating, and over-reliance on automated assistance [14]. The aim of this article is to examine how students use GPT models during exams, as well as to explore the reasons for not using these models in their studies and how they perceive their use in an academic context.

2. LITERATURE REVIEW

2.1. AI AND EDUCATION

The application of artificial intelligence (AI) in education has been rapidly expanding, attracting increasing scholarly attention in recent years [15, 16]. Research on AI in education (AIEd) has been ongoing for approximately three decades, marked by the establishment of the International AIEd Society (IAIED) in 1997, which publishes the *International Journal of AI in Education* (IJAIED) and organizes the annual AIEd conference. Despite these long-standing efforts, educators are still in the early stages of exploring AI's full pedagogical potential, particularly in its ability to enhance learning experiences, personalize instruction, and support learners throughout the student life cycle [15]. The integration of AI into educational settings is gaining momentum, with institutions actively experimenting with AI-driven tools to innovate teaching and learning methods. Initiatives such as Harvard Sandbox [17] exemplify how AI is being incorporated into educational frameworks, fostering both technological advancements and discussions on the ethical and pedagogical challenges associated with its use.

Recent research has tested AI's ability to mimic human-like interactions, particularly through the Turing Test, where participants engaged in five-minute conversations with either a human or an AI model. The findings revealed that GPT-4 was identified as human 54% of the time, outperforming GPT-3.5 (50%) and ELIZA (22%), though still falling below the identification rate of actual human participants (67%) [18]. Another study found that ChatGPT-4's behavior was statistically indistinguishable from that of humans, frequently demonstrating cooperative and altruistic tendencies [19]. While these findings underscore the advancements in AI-driven conversation, they also raise critical concerns about AI's growing role in education and student engagement. One of the concerns is that some students may prefer interacting with AI models rather than teachers, driven by a fear of judgment in traditional learning environments. At the same time, ChatGPT can reduce anxiety among students who lack academic support or confidence in seeking help, thereby encouraging help-seeking behaviors and improving overall learning engagement [7]. Additionally, ChatGPT proves particularly beneficial for non-native English speakers, assisting them in producing higher-quality essays and thereby enhancing writing skills and academic performance [20]. However, while GPT appears effective in fostering creativity, problem-solving abilities, and conceptual understanding, positioning it as a valuable "object-to-think-with" that encourages deeper reflection and intellectual engagement [21], concerns remain that its widespread use may diminish critical thinking skills [21]. Over-reliance on ChatGPT for academic tasks may limit students' engagement in meaningful interactions, discussions with peers and instructors, and opportunities to develop independent analytical thinking [14, 21]. It stands out for its ability to answer questions, write essays, and generate creative texts, significantly surpassing the capabilities of earlier language models [14].

2.2. AI AT UNIVERSITY

As AI continues to play an increasingly role in education [13, 15–16], it is crucial to strike a balance between leveraging AI's benefits and ensuring that students remain active, critical participants in the learning process [15] rather than passive consumers of AI-generated

content. A university lecturer in Australia detected AI-generated content in one-fifth of student assessments, raising growing concerns about the impact of AI tools like ChatGPT on academic integrity and exam security [22].

A recent study by [13] in their article *Students' Attitudes Toward ChatGPT in Education* examined the perspectives of 189 university students (aged 17 to 52, mean age: 21.83) using a non-probabilistic sampling method. The study found that STEM students exhibited a significantly more favorable attitude toward ChatGPT compared to students in social sciences and humanities, particularly in recognizing its potential to enhance learning, accelerate problem-solving, and increase efficiency. Additionally, STEM students expressed stronger positive emotions toward ChatGPT, including enthusiasm, joy, and curiosity. The findings further revealed that 65.7% of STEM students had previous experience with ChatGPT, compared to only 16.8% of students in social sciences and humanities. Moreover, STEM students showed a greater willingness to engage with ChatGPT in the future. Statistical analysis identified notable differences between the two groups across most examined aspects, particularly regarding emotions, perceptions of AI, and its role in education [13].

Understanding why students turn to GPT models is crucial for evaluating their impact on education. According to Hasanein and Sobaih [14, p. 2605], the primary motivators for using ChatGPT include quick access to information, personalized learning support, and improved language proficiency. However, these benefits come with significant ethical and academic challenges, such as issues with data reliability [14], the risk of plagiarism [13], and broader concerns regarding academic dishonesty [22]. Despite these concerns, the integration of generative AI into education presents opportunities to enhance the learning experience by offering personalized support [16]. According to [23, p. 1208] AI-driven models can tailor educational content to individual needs, skill levels, and learning styles, significantly improving student engagement and comprehension. ChatGPT, in particular, adapts dynamically by analyzing users' previous interactions and adjusting its responses based on context and individual preferences [24, 25].

The widespread use of AI tools like GPT may lead to a decline in the importance of traditional memorization-based learning, especially given the instant access to AI-generated answers for almost any question. As a result, higher education institutions must adapt their teaching strategies to keep pace with the changing expectations and learning behaviors of students, ensuring that AI is integrated in ways that enhance critical thinking and deep learning rather than replace foundational knowledge acquisition.

3. METHOD

3.1. PROCEDURE

In this study, we first precised the research area, focusing on students' use of GPT models. We then refined our scope to examine their application in completing academic tasks. A comprehensive review of existing literature was conducted to identify key findings, covered aspects, research gaps, and areas requiring further analysis. This study seeks to bridge existing research gaps by addressing the following main research question: How do different groups

of students use GPT models in the learning process? This study was part of a larger investigation into student engagement with GPT models. While the full study included both closed and open-ended survey questions, this article focuses exclusively on the qualitative responses to explore how students describe their experiences with AI in academic tasks.

3.2. RESEARCH DESIGN AND SAMPLE

The questionnaire was created using Google Forms, consisted of 23 questions, including 15 closed-ended questions with predefined answer options, 3 semi-open-ended questions where respondents could choose from given answers or/and provide their own, and 5 open-ended questions allowing for free expression of thoughts and experiences. Data collection took place between December 2024 and January 2025, lasting three weeks, during which we gathered 792 responses. With the approval of the university administration, the survey was distributed via email to all full-time undergraduate and graduate students at AGH University of Krakow, one of Poland's largest technical universities, reaching a total of 19,123 students. The study was anonymous, and the introduction on the first page of the survey explained the research objective (understanding students' practices in using GPT models) and outlined the thematic sections of the questionnaire. The survey consisted of several key thematic categories:

1. General experience with GPT models. Whether the respondent had prior exposure to these tools and why they chose (or chose not) to use them. If someone hasn't used them, we asked open ended question- why? And then this person would only fall in demographic section.
2. Use of GPT models for academic tasks. The types of assignments (essays, projects, presentations) for which students use GPT models, as well as the frequency and extent of their use.
3. Support in exam preparation. The degree to which GPT models assist in preparing for assessments and exams, and the specific functions students rely on most.
4. Opinions on the value and impact of GPT models. Students' perspectives on the benefits and drawbacks of GPT use in terms of academic efficiency, motivation for learning, and task completion.

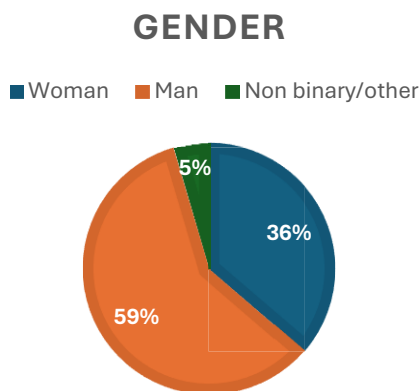


Fig. 1. Respondents gender

Completing the survey took no more than 10 minutes. The number of questions each respondent answered varied depending on their responses. Questionnaire included both open-ended and closed-ended questions. The sample consisted of 792 people: 288 women, 468 men, and 36 individuals identifying as non-binary or other (Fig. 1). Regarding the distribution of study levels, 258 participants (32.6%) were first-year students, 192 (24.2%) were in their second year, 139 (17.6%) in their third year, 109 (13.8%) in their fourth year, and 94 (11.9%) in their fifth year (Fig. 2).

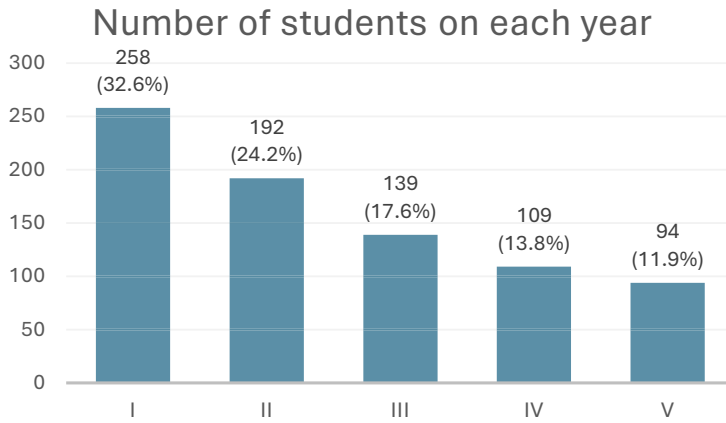


Fig. 2. Respondents year of study

The qualitative component of the study focused on the open-ended responses related to students' use of GPT models during exams. Only students who declared using GPT during exams were included in this analysis, ensuring that the data reflects actual usage patterns. The following questions were examined as part of the analysis:

1. For what purposes did you use GPT models during exams (without the instructor's knowledge)?

A total of 107 responses were collected and categorized into two primary categories: (1) verification of answers and (2) generation of exam responses. Additionally, a separate category labeled "other" ($N = 2$) was created for responses that did not align with the predefined categories.

2. Why did you decide to use GPT models during the exam (without the instructor's knowledge)?

A total of 106 responses were collected and categorized into four primary motivational factors: (1) lack of knowledge or preparation, (2) lack of respect for the course's value, (3) time constraints during the exam, and (4) the use of GPT models for answer verification. An additional category, labeled "other" ($N = 9$), was used for responses that did not fit any of the predefined categories.

It is important to note that some responses were assigned to more than one category; therefore, the sum of responses within categories exceeds the total number of responses collected.

4. RESULTS

4.1. USE OF GPT MODELS IN EXAM SETTINGS

The survey results indicate that more than half of the respondents (58.5%) believe that students use GPT models during exams without the instructor's knowledge, either frequently (25%) or occasionally (33.5%) (Fig. 3).

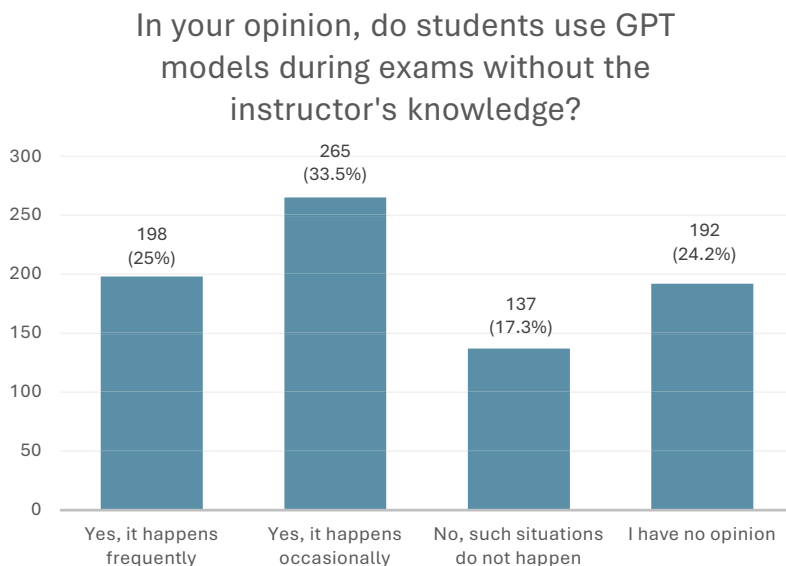


Fig. 3. Student perceptions of unauthorized GPT use during academic exams

These findings provide critical insights into the extent of AI usage in academic assessments, highlighting that while most students abstain from unauthorized AI use, a portion of the student body actively incorporates GPT into their exam strategies. This variation in usage patterns underscores the need for further exploration of students' motivations and ethical considerations, which are examined in the following sections.

The results indicate that there is no significant difference in students' perception of GPT use during exams based on the form of the exam¹. While online exams show a slightly higher reported usage of GPT models ($N = 427$, 79.5%) compared to stationary exams ($N = 368$, 92.2%), the gap is not substantial, suggesting that concerns about unauthorized AI use exist in both formats (Fig. 4).

The survey results indicate that the majority of students did not use GPT models during exams (Fig. 5) without the instructor's knowledge, with $N = 662$ (83.5%) stating that they never engaged in such behavior. However, a significant minority admitted to using AI tools during assessments.

¹ The question allowed respondents to choose two options, meaning the percentages do not sum up to 100%.

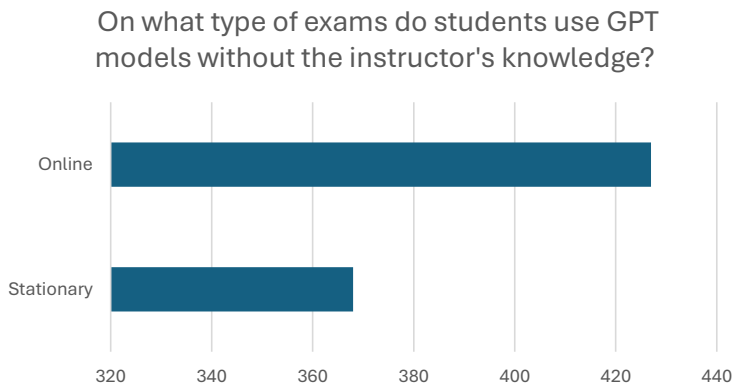


Fig. 4. Use of GPT models during exams without the instructor's knowledge-type of exam

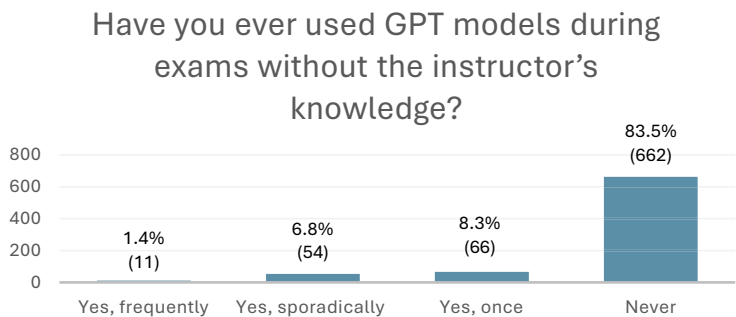


Fig. 5. Use of GPT models during exams without the instructor's knowledge- frequency

The students' predictions (see Fig. 4) regarding the use of GPT models are provided alongside their self-reported declarations of using GPT models during different types of exams (Fig. 6). This allows for a comparison between perceived and actual usage, offering insights into potential discrepancies in awareness and behavior. Moreover, this suggests that if a student intends to use GPT models during an exam, they will do so regardless of the exam format.

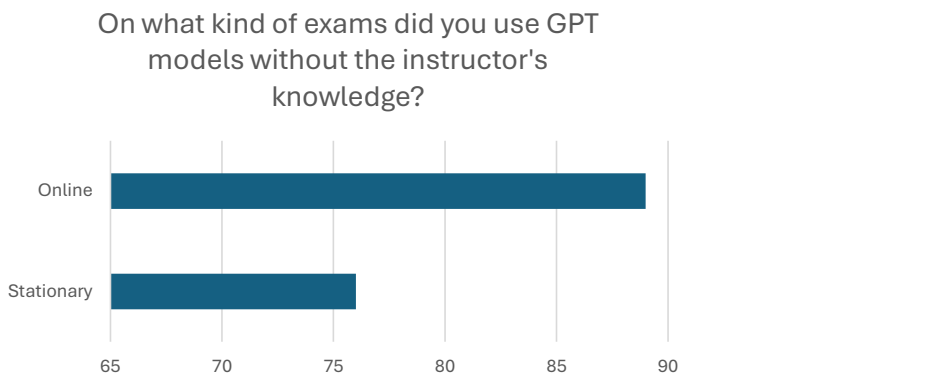


Fig. 6. Use of GPT models during exams without the instructor's knowledge, declaration-type of exam

4.2. FOR WHAT PURPOSES DID YOU USE GPT MODELS DURING EXAMS (WITHOUT THE INSTRUCTOR'S KNOWLEDGE)?

Generation of exam responses

A significant number of students ($N = 82$) used GPT models to generate entire exam responses, a practice that raises concerns about academic integrity. This category includes: generating responses for multiple-choice and open-ended test questions, solving mathematical problems, and producing programming code. Several students reported using GPT to define concepts or explain differences between given terms, indicating that AI was used for conceptual clarification rather than original problem-solving. Others admitted using GPT to find answers to open-ended questions, complex problems, or computational tasks that they were unable to solve independently. One respondent explained, "The test questions were too difficult, and I was unable to come up with answers, so I used GPT to generate them." This aligns with the findings of [14], who noted that students often turn to AI when faced with academic challenges beyond their skill level or preparation.

Interestingly, some students used AI selectively, stating that they relied on it only for subjects they considered irrelevant or poorly structured. One respondent stated, "I didn't cheat in courses that I respect, but I used ChatGPT to pass those that I consider useless."

Verification of answers

The second dominant way students used GPT models was for verifying their answers before submitting them ($N = 28$). This category includes: checking multiple-choice (ABCD) responses, confirming calculations and problem-solving steps, validating programming code correctness, summarizing/rechecking theoretical concepts. This category pertains to verifying the correctness of answers, using GPT as an assistant rather than a tool to solve the entire exam.

Students described this use as a way to ensure accuracy rather than to generate answers from scratch. One respondent explained, "Even if I was sure about my answer, I would paste it into the chat to confirm whether my thinking was correct." Another stated, "It was faster to check an answer with ChatGPT than to search for it manually online." However, some students acknowledged the risks of AI errors, with one noting, "I usually used ChatGPT to confirm my answers, but a few times I ended up changing my correct answer to an incorrect one suggested by the chatbot."

4.3. WHY DID YOU DECIDE TO USE GPT MODELS DURING THE EXAM (WITHOUT THE INSTRUCTOR'S KNOWLEDGE)?

Lack of knowledge or preparation

A significant number ($N = 65$) of students reported using GPT models during exams due to insufficient preparation or a lack of subject knowledge. Many respondents admitted that they had not studied adequately and turned to AI as a last resort to avoid failing. The responses indicate that students perceive AI as a safety net, allowing them to attempt answering exam questions even when they lack the necessary knowledge. One student stated "I didn't study

for the test and I didn't want to fail" while another admitted "I had no idea how to solve the task so I used ChatGPT". These statements highlight that AI is often employed as an emergency measure, particularly among students who feel underprepared or lack confidence in their ability to complete the exam on their own. The reliance on AI in such cases suggests that students view GPT models as a way to bridge knowledge gaps in real time, rather than as a tool for deep learning or conceptual understanding. Additionally, some students expressed a sense of resignation regarding their lack of preparation, indicating that AI provided them with the only feasible option to complete their exams.

Lack of respect for the course's value

Some ($N = 13$) reported using GPT models during exams only for subjects they perceived as unimportant or irrelevant to their academic and professional goals. These students viewed AI as a shortcut to passing courses that they believed held little educational value. One student stated „I used AI only in elective courses that don't contribute to my main area of study" while another remarked „Some courses are just a waste of time so I don't see the problem with using GPT to pass them". A similar sentiment was reflected in the response „I only used GPT for subjects that are just fillers in my curriculum and don't contribute to my skills". These statements suggest that students rationalize their AI use by assessing the perceived usefulness of a course, choosing to rely on GPT models not because of academic difficulties but due to a lack of engagement or interest in certain subjects.

Further qualitative analysis reveals that students who exhibited this pattern of AI use often justified their behavior based on how they viewed the structure of their curriculum. Several respondents criticized their programs for including courses that they believed were irrelevant to their future careers, leading them to deprioritize these subjects and seek AI-generated assistance instead. This raises concerns regarding student motivation and engagement in multi-disciplinary curricula, as it suggests that some students may disengage from courses outside their primary academic focus and rely on AI to complete coursework with minimal effort.

Time constraints during the exam

Some of students ($N = 10$) indicated that strict exam time constraints were a primary factor in their decision to use GPT models. Many respondents struggled to fully process and analyze complex questions under timed conditions, leading them to rely on AI-generated responses to keep up with the pace of the assessment. One respondent explained, "The exam was too short for me to properly analyze the questions, so I used GPT." Another student shared, "The test had very little time allocated for problem-solving, so AI helped me keep up." Similarly, another stated, "I wouldn't have used AI if the exam allowed enough time for proper thinking." These responses suggest that students view AI as a compensatory mechanism to mitigate the limitations of traditional timed assessments, rather than as a means of dishonesty.

Verification of answers

Students reported ($N = 9$) also using GPT models as a tool for verification rather than outright cheating, emphasizing that AI-assisted checks provided them with a sense of confidence in their responses. One student explained, "Checking my answers with GPT made me feel more

confident that I wouldn't fail." Another respondent stated, "I just needed reassurance that my response was correct before submitting it." Similarly, another student noted, "I didn't want to risk losing points for a minor mistake, so I checked my answers in GPT." These responses suggest that students do not always use AI to generate answers but rather to validate their own knowledge, reflecting a more nuanced approach to AI-assisted learning.

5. CONCLUSIONS

The findings of this study underscore the complex role of GPT models in academic settings, revealing that students use AI both as a support tool for learning and as a shortcut to bypass academic effort. While some students leverage AI for answer verification and confidence-building, others employ it to circumvent traditional assessment methods, particularly in subjects they perceive as less relevant to their academic or professional goals. This reinforces the long-standing divide between students who are committed to deep learning and those who seek to minimize effort through external aids [7, 13].

The study also highlights disciplinary differences in AI adoption, with some students rationalizing their AI use based on the perceived value of a course. This aligns with [13], who observed that students often justify GPT use in subjects they deem unrelated to their future careers. The findings suggest that students are less likely to engage with subjects they perceive as irrelevant to their future careers or personal interests. A common concern among respondents was the excessive volume of material, which many felt exceeded their ability to effectively absorb and retain information. This frustration with being required to study topics they deem unnecessary indicates that student motivation is closely tied to the perceived utility of a course. These findings align with prior research showing that students are more engaged when coursework is directly linked to their professional [15]. Moreover, the recurring issue of curriculum overload raises questions about the effectiveness of traditional higher education structures. If students consistently report being overwhelmed by the volume of required material, it may signal a need for curricular reforms that emphasize depth over breadth. To address these concerns, universities should consider revising assessment models and instructional strategies to ensure that learning remains both meaningful and manageable.

Another key motivation for AI use was time constraints during exams, with students citing limited time to process complex questions as a primary factor in turning to GPT models. This finding supports research by [20], who emphasized that AI is increasingly used as a time-management tool by students under academic pressure. Furthermore, [14] found that students often resort to AI when overwhelmed by time constraints, rather than content difficulty itself. These findings suggest that universities should re-evaluate assessment formats, shifting from traditional time-pressured exams to AI-integrated assessments that promote critical thinking and deeper engagement rather than reinforcing surface-level recall.

In terms of academic integrity, this study echoes the concerns raised by [7], who noted that while AI has the potential to support learning, its unregulated use in assessments poses challenges for institutions. Although some students reported using GPT models for self-verification rather than direct cheating, others admitted to passive reliance on AI-generated

answers. The findings align with [11], who emphasized that AI-generated content is not always reliable, leading some students to inadvertently submit incorrect information. These results highlight the broader need for institutional policies that balance AI's potential with academic integrity concerns. Universities should focus not only on AI detection and plagiarism prevention but also on student motivation, engagement strategies, and responsible AI use.

Limitations

While this study provides valuable insights into student use of GPT models during exams, certain limitations should be acknowledged. Although the study is based on $N = 792$ responses, it is not fully representative of the broader student population. The research was conducted within a single institution, which limits the generalizability of the findings to other universities, disciplines, and cultural contexts. Future research should seek to expand the sample size and include participants from a broader range of institutions and educational backgrounds. Self This study relies on self-reported data, which may introduce response bias, as students may underreport or exaggerate their use of AI due to concerns about academic integrity or personal perceptions of AI ethics. Future studies could incorporate direct observational methods or AI usage tracking to provide a more objective assessment. While this study focuses on GPT usage during exams and assignments, it does not comprehensively address the impact of AI on overall academic performance, long-term learning outcomes, or faculty perspectives. Additional research should investigate the broader effects of AI on student success, faculty grading practices, and institutional AI policies.

6. FUTURE RESEARCH DIRECTIONS

Given the rapid integration of AI into higher education, further research is necessary to better understand its implications for student learning, academic integrity, and institutional policies. One critical area requiring exploration is qualitative research through focus groups, as the present study provides a broad quantitative overview but does not fully capture the motivations, ethical considerations, and decision-making processes behind students' AI use. Prior research suggests that students engage with AI in various ways, ranging from passive reliance to active engagement, yet the underlying reasons for these differences remain underexplored [14]. In-depth qualitative studies could provide more granular insights into how students justify their AI use, particularly in high-stakes academic settings. Another important direction for future research is comparative studies across disciplines to investigate how AI adoption varies between STEM and humanities fields. Previous studies have indicated that students in STEM disciplines tend to exhibit a more favorable attitude toward AI tools, particularly for problem-solving tasks and technical applications, whereas students in social sciences and humanities often approach AI with greater skepticism due to concerns about originality and ethical considerations [13]. However, little is known about how these differences translate into actual AI usage patterns during assessments. Future studies should analyze whether specific academic disciplines are more susceptible to AI reliance and how different assessment formats influence student behavior.

REFERENCES

- [1] McCulloch W.S., Pitts W., *A logical calculus of the ideas immanent in nervous activity*, Bulletin of Mathematical Biophysics, vol. 52, 1990, pp. 115–133.
- [2] Russell S.J., Norvig P., *Artificial intelligence: A modern approach*, Pearson, 2016.
- [3] Turing A.M., *Computing Machinery and Intelligence*, Mind, vol. 59(236), 1950, pp. 433–460.
- [4] Cristianini N., *Intelligence reinvented*, New Scientist, vol. 232(3097), pp. 37–41, [https://doi.org/10.1016/S0262-4079\(16\)31992-3](https://doi.org/10.1016/S0262-4079(16)31992-3).
- [5] Baker T., Smith L., *Educ-AI-tion rebooted? Exploring the future of artificial intelligence in schools and colleges*, 2019, Retrieved from Nesta Foundation website: https://media.nesta.org.uk/documents/Future_of_AI_and_education_v5_WEB.pdf [accessed: 5.03.2025].
- [6] Ray P.P., *ChatGPT: A comprehensive review on background, applications, key challenges, bias, ethics, limitations and future scope*, Internet of Things and Cyber-Physical Systems, vol. 3, 2023, pp. 121–154, <https://doi.org/10.1016/j.iotcps.2023.04.003>.
- [7] Sullivan M., Kelly A., McLaughlan P., *ChatGPT in higher education: Considerations for academic integrity and student learning*, Journal of Applied Learning and Teaching, vol. 6(1), 2023, pp. 31–40, <https://doi.org/10.37074/jalt.2023.6.1.17>.
- [8] *Alphabet's \$75 billion AI expansion: Cloud revenue slows, investors react*, TechInformed, 6 February 2025, <https://techinformed.com/google-75b-ai-investment-2025/> [accessed: 5.03.2025].
- [9] OpenAI, *Announcing The Stargate Project*, 21 January 2025, <https://openai.com/index/announcing-the-stargate-project/> [accessed: 5.03.2025].
- [10] Stahl B.C., Eke D., *The ethics of ChatGPT – Exploring the ethical issues of an emerging technology*, International Journal of Information Management, vol. 74, 102700, <https://doi.org/10.1016/j.ijinfomgt.2023.102700>.
- [11] Mitra B., Cramer H., Gurevich O., *Sociotechnical implications of generative artificial intelligence for information access*, arXiv:2405.11612, <https://doi.org/10.48550/arXiv.2405.11612>.
- [12] Perrigo B., *Exclusive: OpenAI used Kenyan workers on less than \$2 per hour to make ChatGPT less toxic*, <https://time.com/6247678/openai-chatgpt-kenya-workers/> [accessed: 5.03.2025].
- [13] Franczyk A., Rajchel A., *Postawy studentów wobec ChatGPT w edukacji*, Horyzonty Wychowania, vol. 23(65), 2024, pp. 89–101, <https://doi.org/10.35765/hw.2024.2365.10>.
- [14] Hasanein A.M., Sobaih A.E.E., *Drivers and consequences of ChatGPT use in higher education: Key stakeholder perspectives*, European Journal of Investigation in Health, Psychology and Education, vol. 13(11), 2023, pp. 2599–2614, <https://doi.org/10.3390/ejihpe13110181>.
- [15] Zawacki-Richter O., Marín V.I., Bond M., Gouverneur F., *Systematic review of research on artificial intelligence applications in higher education – where are the educators?*, International Journal of Educational Technology in Higher Education, vol. 16(1), 39, <https://doi.org/10.1186/s41239-019-0171-0>.

- [16] Chu H.C., Hwang G.H., Tu Y. F., Yang K.H., *Roles and research trends of artificial intelligence in higher education: A systematic review of the top 50 most-cited articles*, Australasian Journal of Educational Technology, vol. 38(3), 2022, pp. 22–42, <https://doi.org/10.14742/ajet.7526>.
- [17] Harvard University Information Technology (HUIT), *AI Sandbox*, n.d., <https://www.huit.harvard.edu/ai-sandbox> [accessed: 5.03.2025].
- [18] Jones C.R., Bergen B.K., *People cannot distinguish GPT-4 from a human in a Turing test*, arXiv:2405.08007, <https://doi.org/10.48550/arXiv.2405.08007>.
- [19] Mei Q., Xie Y., Yuan W., Jackson M.O., *A Turing test of whether AI chatbots are behaviorally similar to humans*, [in:] Proceedings of the National Academy of Sciences, vol. 121(9), e2313925121, <https://doi.org/10.1073/pnas.2313925121>.
- [20] Niloy A.C., Bari M.A., Sultana J., Chowdhury R., Raisa F.M., Islam A., Mahmud S. et al., *Why do students use ChatGPT? Answering through a triangulation approach*, Computers and Education: Artificial Intelligence, vol. 6, 2024, 100208, <https://doi.org/10.1016/j.caeai.2024.100208>.
- [21] Sandu R., Gide E., Elkhodr M., *The role and impact of ChatGPT in educational practices: insights from an Australian higher education case study*, Discover Education, vol. 3(1), 2024, 71, <https://doi.org/10.1007/s44217-024-00126-6>.
- [22] Cassidy C., *Lecturer detects bot-use in one fifth of assessments as concerns mount over AI in exams*, The Guardian 16 January 2023, <https://www.theguardian.com/australia-news/2023/jan/17/lecturer-detects-bot-use-in-one-fifth-of-assessments-as-concerns-mount-over-ai-in-exams> [accessed: 5.03.2025].
- [23] Albdarani R.N., Al-Shargabi A.A., *Investigating the effectiveness of ChatGPT for providing personalized learning experience: A case study*, International Journal of Advanced Computer Science and Applications (IJACSA), vol. 14(11), 2023, s. 1208–1213, <https://doi.org/10.14569/IJACSA.2023.01411122>.
- [24] Przegalinska A., Triantoro T., *Converging minds. The creative potential of collaborative AI*, 1st ed., CRC Press, Boca Raton 2024, <https://doi.org/10.1201/9781032656618>.
- [25] Rospigliosi P. ‘asher’, *Artificial intelligence in teaching and learning: What questions should we ask of ChatGPT?*, Interactive Learning Environments, vol. 31(1), 2023, pp. 1–3, <https://doi.org/10.1080/10494820.2023.2180191>.

Igor Szajer*

ROZWÓJ OSOBISTY Z PERSPEKTYWY STUDENTA

W artykule przedstawiono oraz rozwinęto zagadnienie rozwoju osobistego. Omówiono w nim, czym jest samorozwój i jakie są jego kluczowe aspekty z perspektywy studenta (I i II stopnia). Przeanalizowano wyniki badania ankietowego przeprowadzonego wśród społeczności akademickiej. Zgłębiono zależności między priorytetami rozwoju osobistego a etapem studiów oraz zbadano wpływ presji zewnętrznej na efektywność rozpatrywanego procesu.

PERSONAL DEVELOPMENT FROM A STUDENT'S PERSPECTIVE

The article presents and elaborates on the concept of personal development. It discusses what self-development is and outlines its key aspects from the perspective of (undergraduate and graduate) students. The paper analyzes the results of a survey conducted among members of the academic community. It explores the relationship between personal development priorities and the stage of studies, as well as examines the impact of external pressure on the development process effectiveness.

1. WPROWADZENIE

Problematyka rozwoju osobistego jest często podejmowana w publikacjach nie tylko z zakresu pedagogiki czy psychologii, ale również w literaturze dotyczącej nauk społecznych czy nauk o zarządzaniu i jakości. We współczesnym świecie rozwój osobisty jest ważnym zagadnieniem, gdyż od niego zależy jakość życia i funkcjonowania każdego człowieka, a patrząc szerzej: rozwój społeczeństwa obejmujący postęp cywilizacyjny i technologiczny. Na samorozwój decydują się osoby pochodzące z środowisk i grup demograficznych, które szukając swojego potencjału lub pracując nad słabszymi stronami liczą na poprawę swoich możliwości. Ze świadomym inwestowaniem w swoją przyszłość oraz z dużym zaangażowaniem

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

w proces rozwoju najczęściej możemy się spotkać na uniwersytetach wśród społeczności studenckiej. Czas studiów stanowi dla wielu osób etap wyznaczania nowych celów i intensywnego rozwoju. Jest to okres zdobywania nowych umiejętności, kompetencji oraz poszerzania swojej wiedzy. Rozwój każdego studenta przebiega w odmienny sposób i może się różnić w zależności od podjętego kierunku, etapu studiów czy możliwości oferowanych przez uczelnię. Kierunek studiów określa dziedzinę, w której student rozwija swoją specjalizację. Od etapu studiów mogą zależeć zarówno treści realizowane na zajęciach, jak i bieżące cele rozwoju (na przykład: studenci pierwszego roku mogą kłaść większy nacisk na poznanie nowych ludzi niż na znalezienie pracy, która może być głównym celem studentów na ostatnim roku kształcenia). Natomiast uczelnia, do której uczęszcza student, wpływa na liczbę i różnorodność dostępnych szkoleń i programów rozwojowych. Rozwój społeczności akademickiej nie zawsze jest bezpośrednio związany wyłącznie ze studiami. Może on obejmować zarówno indywidualne zainteresowania osoby, jak i wynikać z zewnętrznej presji. Studia nie gwarantują obecnie zatrudnienia, zaś współczesny rynek pracy oczekuje od kandydatów własnego zaangażowania w zdobywanie nowych umiejętności. Zdaniem pracodawców wielu absolwentom brakuje takich cech, jak kreatywność, innowacyjność czy umiejętność pracy w zespole [1]. Na studentach spoczywa więc dodatkowa presja nadrobienia kompetencji nieuwzględnianych w programie nauczania. Rozwój osobisty studentów może przybierać różne formy. Przed rozpoczęciem analizy sposobu rozumienia zagadnienia przez społeczność akademicką należy jednak wyjaśnić, czym rozwój osobisty różni się od ogólnego procesu rozwoju.

2. ISTOTA ROZWOJU OSOBISTEGO

Rozwój powinien być kojarzony ze wzrostem, postępem i przekształcaniem (w pozytywnym znaczeniu) jednostki. Termin ten ma różne znaczenia w zależności od dziedziny. Według psychologii człowieka zmianą rozwojową będzie wszystko to, co daje poczucie wykorzystania swoich możliwości, osiągnięcia większej autonomii, bycia sobą [2]. W kontekście pedagogicznym rozwój określany jest jako następujące po sobie zmiany w życiu człowieka, realizowane wskutek tkwiących w nim możliwości oraz bodźców płynących z otoczenia [3]. Obie definicje podkreślają zatem proces zmiany oraz realizowania potencjału danej osoby. Można stwierdzić, że w naszym życiu rozwój jest nieunikniony. Wiąże się on z nauką przez całe życie, a wszystkie codzienne doświadczenia, w sposób przypadkowy i losowy, wpływają na stan naszej wiedzy.

Rozwój osobisty możemy określić jako „doświadczenie samoukierunkowanego rozwoju” [4]. Według innego źródła rozwój osobisty to działanie zawsze bazujące na związku przyczynowo-skutkowym, gdzie przyczyną jest potrzeba i pragnienie, a skutkiem – rezultat działania podjętego w celu zrealizowania pragnienia [5]. Samorozwój zatem jest procesem o wyznaczonym kierunku, którego przebieg oraz cel musimy wyznaczyć sobie sami. Z tego względu kluczowym aspektem odróżniającym rozwój osobisty od ogólnego procesu jest jego intencjonalność oraz świadome ukierunkowanie. Natomiast działanie możemy uznać za w pełni świadome i celowe w momencie, gdy jednostka samodzielnie odpowiada za przebieg własnego rozwoju. Dopiero w tym kontekście zarówno określenie konkretnych celów, jak

i świadome dążenie do ich realizacji nadaje rozwojowi charakter osobisty. Wymaga to jednak autorefleksji oraz przyjęcia pewnych standardów, które możemy określić symboliczną „poprzeczką” wyznaczającą oczekiwany poziom osiągnięć.

3. CZYNNIKI MAJĄCE WPŁYW NA JAKOŚĆ ROZWOJU

Pomimo chęci nie każde podejście do rozwoju osobistego będzie efektywne. Jakość procesu jest składową wielu czynników, mających zarówno pozytywny, jak i negatywny wpływ na efekt końcowy. Czynniki te mogą pochodzić ze sfery zewnętrznej lub wewnętrznej. Do zewnętrznych zaliczamy wszystkie posiadane zasoby wpływające na nasze możliwości działania i okoliczności, w których się znajdujemy. Czynniki wewnętrzne zaś wynikają głównie z indywidualnego charakteru, osobowości oraz doświadczeń. Do grupy tych czynników zaliczamy głównie motywację, umiejętność wyznaczania celów oraz wytrwałość w ich realizacji.

Motywacja jest szeroko omawianym w psychologii człowieka pojęciem, dla którego nie istnieje jedna uniwersalna definicja. Według słownika psychologicznego Amerykańskiego Towarzystwa Psychologicznego (American Psychological Association, APA) motywacja to gotowość osoby do podjęcia wysiłku fizycznego lub psychicznego w dążeniu do osiągnięcia celu lub rezultatu [6]. Ma ona kluczowe znaczenie w kontekście rozwoju osobistego, ponieważ bezpośrednio wpływa na efektywność procesu niczym paliwo napędzające działania zmierzające do realizacji wyznaczonego celu.

Umiejętność wyznaczania celów w istotny sposób decyduje o jakości rozwoju osobistego ze względu na jej bezpośrednie powiązanie z motywacją oraz wytrwałością w działaniu. Odpowiednio wyznaczony cel może wzmacniać te czynniki – ambitniejsze cele (*high goals*) prowadzą do większego wysiłku i/lub wytrwałości w działaniu niż cele proste lub nieprecyzyjne [7]. Oznacza to, że im wyżej postawimy sobie poprzeczkę, tym więcej energii będziemy czerpać do działania. Niemniej jednak najnowsze badania wskazują na potencjalnie negatywne konsekwencje nadmiernie postawionych wymagań. Niespełnienie określonego i ambitnego celu może skutkować spadkiem samooceny oraz obniżeniem motywacji jednostki [8]. Aby uniknąć tych konsekwencji, należy zadbać o równowagę pomiędzy podejmowanym wyzwaniem a realnymi możliwościami jednostki. Tym sposobem możliwe jest zwiększenie poziomu motywacji oraz wytrwałości przy jednoczesnym zminimalizowaniu ryzyka ich utraty w przypadku niepowodzenia.

Liczne teorie motywacji starają się wyjaśnić, co tak naprawdę skłania ludzi do działania. Najpopularniejszą z nich jest teoria piramidy potrzeb Abrahama Masłowa, którą autor po raz pierwszy przedstawił w artykule pt. *A Theory of Human Motivation* [9]. Koncepcja ta zakłada istnienie potrzeb ułożonych według hierarchii, od której zależeć ma ludzka motywacja. Piramida Masłowa obejmuje pięć poziomów: (1) potrzeby fizjologiczne, (2) potrzeby bezpieczeństwa, (3) potrzebę przynależności, (4) potrzebę uznania oraz (5) potrzebę samorealizacji. Teoria ta zakłada, że potrzeby wyższego stopnia ujawniają się dopiero po zaspokojeniu potrzeb niższego rzędu. Przykładowo: dopóki człowiek nie zaspokoi podstawowych potrzeb fizjologicznych, takich jak dostęp do jedzenia i wody, nie będzie zwracał uwagi na własne poczucie bezpieczeństwa. Hierarchia została przedstawiona graficznie na rysunku 1.



Rys. 1. Graficzne przedstawienie piramidy potrzeb Masłowa

Na samym szczycie hierarchii Maslow umieścił potrzebę samorealizacji. Według teorii człowiek powinien odczuć pragnienie rozwoju dopiero po zaspokojeniu pragnień pozostałych stopni piramidy. Ze względu na to, że potrzeba stanowi źródło motywacji, dążenie do samorealizacji bez uprzedniego zaspokojenia pozostałych pragnień może niekorzystnie wpływać na efektywność niniejszego procesu. Dlaczego jednak ktoś miałby się podjąć rozwoju osobistego bez jednoczesnej wewnętrznej potrzeby działania w tym zakresie? Na ten problem może wpływać między innymi presja zewnętrzna. Studenci mogą doświadczać stresu związanego z wymaganiami akademickimi czy presją zawodową, co negatywnie oddziałuje na ich samopoczucie [10]. Ponadto czynniki te mogą skłaniać ich do rozwoju, który niekoniecznie będzie efektywny i satysfakcjonujący.

4. STUDIA A ROZWÓJ OSOBISTY

Studenci obierają różne ścieżki samorozwoju. Niektórzy mogą kłaść większy nacisk na zdobywanie wiedzy i znajomość teorii, inni koncentrują się na rozwijaniu umiejętności praktycznych. Dla części studentów priorytetem może być poszerzanie sieci kontaktów i znajomości. Wybór kierunku rozwoju osobistego zależy od indywidualnej interpretacji tego pojęcia, aktualnej sytuacji życiowej oraz wartości, jakie przypisuje swoim potencjalnym celom. Poglądy studentów mogą być także uzależnione od realizowanego przez nich etapu kształcenia. Studenci zbliżający się do uzyskania dyplomu częściej sugerują się kreowaniem ścieżki zawodowej w decyzjach niż osoby rozpoczynające swoją edukację na uczelni wyższej. Uczestnicy studiów I stopnia dopiero odkrywają swoje zainteresowania, dostosowują się do akademickiego środowiska i zdobywają cenną wiedzę teoretyczną. Studenci II stopnia mogą natomiast skupiać się na planowaniu przyszłości, wybierając specjalizację zgodną z ich wymarzoną ścieżką kariery i rozwijając konkretne umiejętności praktyczne. Można zatem sformułować pytanie badawcze: czy podejście studentów do rozwoju osobistego różni się w zależności od etapu kształcenia?

5. BADANIA I WYNIKI

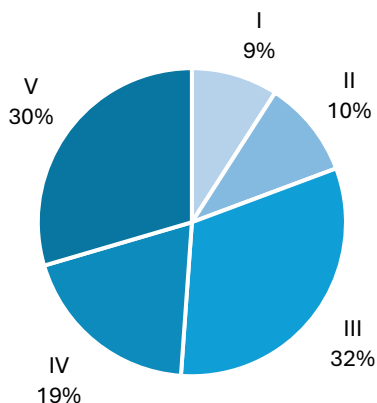
5.1. CHARAKTERYSTYKA BADAŃ I PRÓBY BADAWCZEJ

Celem badań było uzyskanie odpowiedzi na dwa kluczowe pytania:

1. Czy podejście studentów I i II stopnia do rozwoju osobistego jest różne?
2. Czy rozwój osobisty powinien wynikać z presji zewnętrznej?

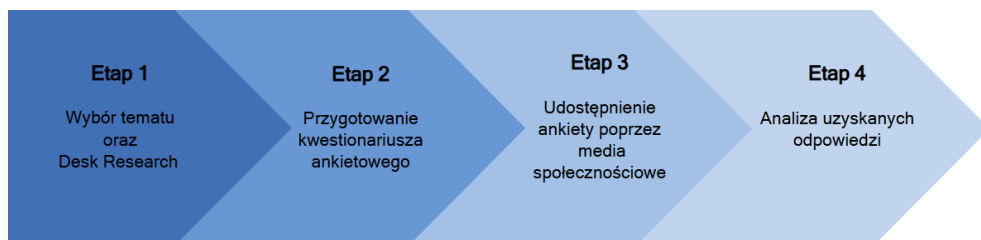
W badaniu wzięło udział 88 studentów z różnych kierunków studiów. Respondentów podzielono na dwie oddzielne grupy: studentów I stopnia oraz studentów II stopnia. W tym celu w metryczce zadano ankietowanym pytanie o treści: „Na którym roku obecnie studiujesz?”. Wyniki przedstawiono na wykresie (rys. 2).

Na którym roku obecnie studiujesz?



Rys. 2. Rozkład odpowiedzi na pytanie: „Na którym roku obecnie studiujesz?”

Na podstawie wyników przypisano ankietowanych do dwóch grup, których odpowiedzi będą porównywane w dalszej części pracy. Studentów I stopnia było 45 (ok. 51%), a II stopnia – 43 (ok. 49%). Badania składały się z czterech etapów przedstawionych na rysunku 3.



Rys. 3. Etapy badań

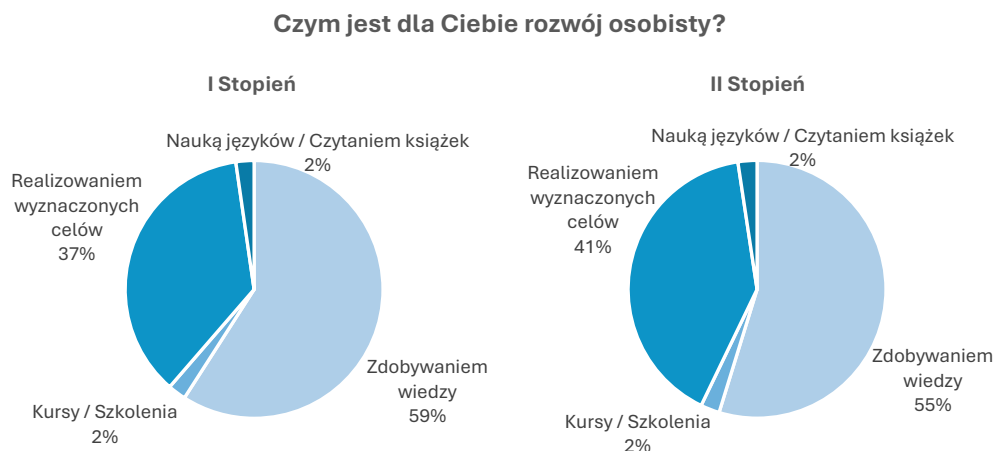
W pierwszej kolejności przeprowadzono *desk research* (etap 1) dotyczący definicji oraz teorii związanych z rozwojem osobistym i motywacją. Do realizacji badań wykorzystano przygotowany kwestionariusz ankietowy (etap 2). Był on anonimowy, zawierał 21 pytań – otwartych, zamkniętych i wielokrotnego wyboru. Ankietę przeprowadzono w formie online (etap 3) za pośrednictwem mediów społecznościowych, takich jak Facebook czy Messenger. Kwestionariusz dostępny był od 5 do 10 grudnia 2024 roku. Na podstawie zebranych wyników dokonano analizy odpowiedzi oraz zinterpretowano różne podejścia studentów do własnego rozwoju osobistego, skupiając się na ich źródłach motywacji oraz priorytetach. Badania pozwoliły wskazać różnice pomiędzy dwiema grupami, a po analizie wyników sformułowano wnioski przedstawione w dalszej części pracy.

5.2. ANALIZA UZYSKANYCH ODPOWIEDZI

Wyniki ankiety zostały podzielone na dwie części: w pierwszej omówione zostaną odpowiedzi związane z pytaniem dotyczącym rozwoju studentów I i II stopnia, w drugiej – aspekty związane z działaniem pod presją.

Czy podejście studentów I i II stopnia do rozwoju osobistego jest różne?

Pierwszym celem było zbadanie, w jaki sposób studenci w poszczególnych grupach rozumieją pojęcie rozwoju osobistego. Prognozowano, że studenci II stopnia będą wykazywać dojrzałe podejście do tego pojęcia, częściej kojarząc je z realizacją celów niż z wiedzą. Wyniki przedstawiono na rysunku 4.

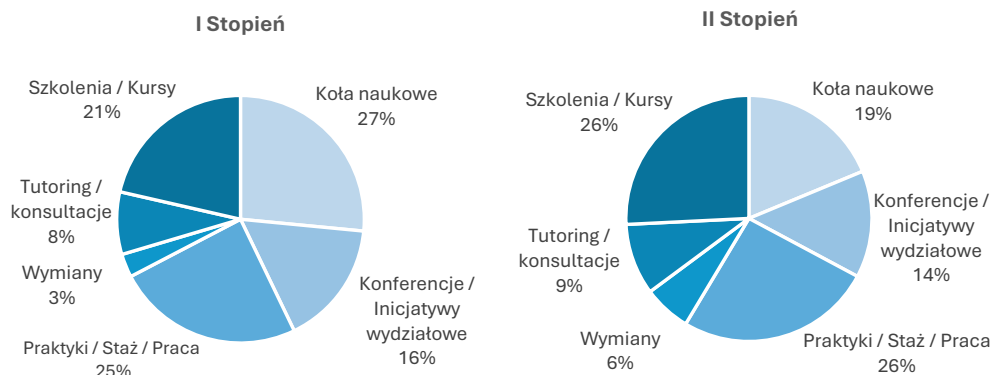


Rys. 4. Rozkład odpowiedzi na pytanie: „Czym jest dla Ciebie rozwój osobisty?”

Wykresy nie wykazują znacznych różnic, jednak wyniki sugerują, że studenci II stopnia nieznacznie częściej postrzegają rozwój jako realizację swoich wyznaczonych celów niż studenci I stopnia. Większość badanych jednak utożsamia rozwój z poszerzaniem wiedzy.

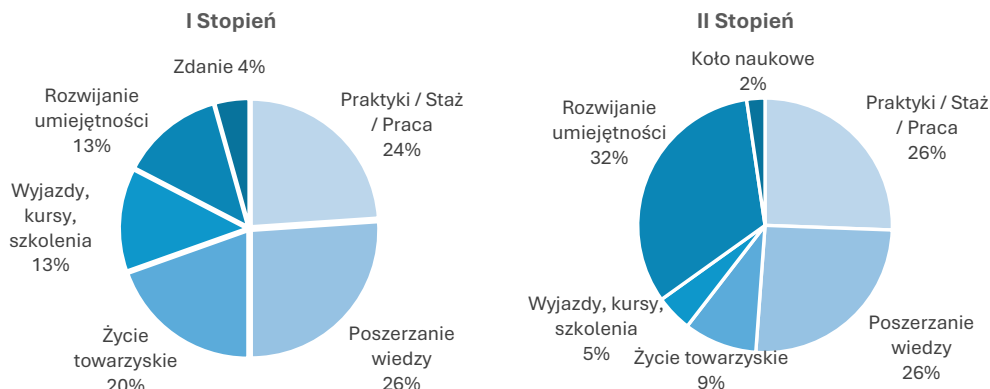
W kolejnym kroku zapytano ankietowanych o rodzaj podjętych form rozwoju (rys. 5) oraz o obecne priorytety związane ze studiami (rys. 6). Ich celem było zidentyfikowanie, w jaki sposób studenci kierują swoim rozwojem w zależności od etapu studiów.

W jakich formach rozwoju brałeś/-aś udział?



Rys. 5. Rozkład odpowiedzi na pytanie: „W jakich formach rozwoju brałeś/-aś udział?”

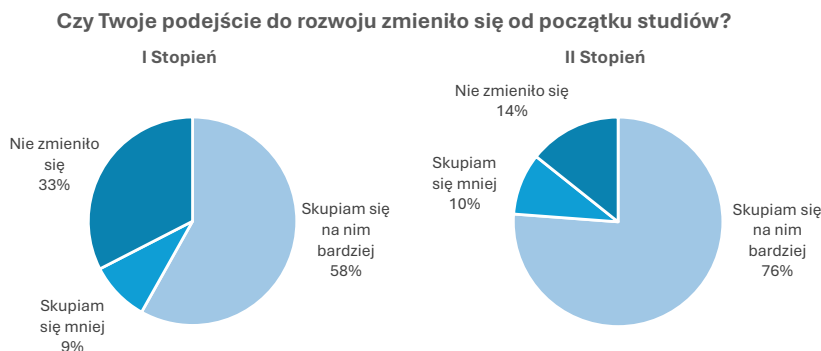
Co jest dla Ciebie najważniejsze w tym momencie na studiach?



Rys. 6. Rozkład odpowiedzi na pytanie: „Co jest dla Ciebie najważniejsze w tym momencie na studiach?”

Studenci II stopnia przykładają większą wagę do rozwijania swoich kompetencji i umiejętności praktycznych, niż deklarują to studenci I stopnia. Częściej wybierają szkolenia i kursy oraz przedkładają zdobywanie umiejętności nad inne formy rozwoju. Studenci pierwszych lat za to bardziej koncentrują się na życiu towarzyskim i działalności w kołach naukowych. Mimo wszystko obie grupy w zbliżonym zakresie odbywają staże lub praktyki, a także podejmują pracę zarobkową. Na obu etapach edukacji poszerzanie wiedzy jest dla studentów równie istotną częścią rozwoju osobistego.

Ostatnie pytanie tej części dotyczyło kształtowania się podejścia badanych do własnego rozwoju wraz z upływem czasu. Odpowiedzi przedstawia rysunek 7.



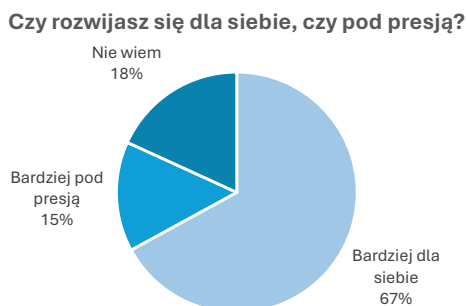
Rys. 7. Rozkład odpowiedzi na pytanie:
„Czy Twoje podejście do rozwoju zmieniło się od początku studiów?”

Jak wynika z badań, studenci II stopnia bardziej skupiają się na swoim rozwoju osobistym niż na początku studiów. Zmiana podejścia może wynikać z rosnącej świadomości konkurencji na rynku pracy, przez co dążą oni do zdobywania umiejętności i kompetencji zwiększających szansę na zatrudnienie. Natomiast w mniejszym zakresie presję tę odczuwają studenci I stopnia, ponieważ ich wejście na rynek jest jeszcze odległe. W rezultacie nie koncentrują się tak bardzo na samorozwoju, a tym samym zdobywaniu umiejętności.

Czy rozwój osobisty powinien wynikać z presji zewnętrznej?

Drugim celem badania było określenie, czy jakość rozwoju osobistego zależy od źródła motywacji – wynikającego z presji zewnętrznej lub z potrzeby wewnętrznej. Badanych podzielono na dwie grupy, jako kryterium przyjmując źródło motywacji, którym się kierowali. Odpowiedzi przedstawiono na rysunku 8.

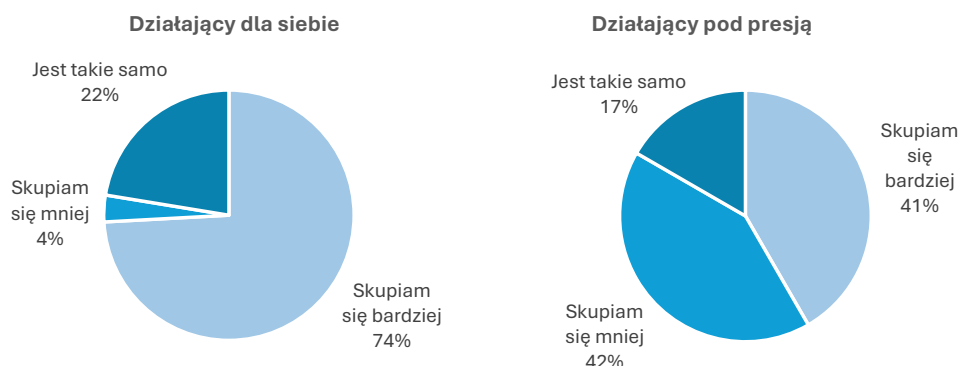
Aż 67% procent ankietowanych stwierdziło, że rozwijają się przede wszystkim dla siebie, podczas gdy 15% badanych wskazało presję jako główne źródło motywacji. Na podstawie wyników wyodrębniono dwie grupy, które posłużyły do filtrowania odpowiedzi w następnych pytaniach.



Rys. 8. Rozkład odpowiedzi na pytanie: „Czy rozwijasz się dla siebie, czy pod presją?”

W następnym pytaniu porównano obie grupy pod kątem ich podejścia do rozwoju oraz kształtowania się tego podejścia w trakcie studiów. Wyniki zobrazowano na rysunku 9.

Czy Twoje podejście do rozwoju zmieniło się od początku studiów?

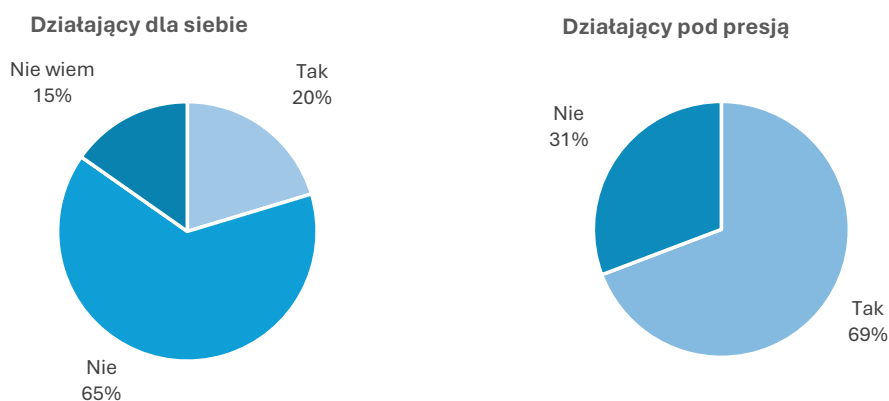


Rys. 9. Rozkład odpowiedzi na pytanie:
„Czy twoje podejście do rozwoju zmieniło się od początku studiów?”

Uzyskane odpowiedzi sugerują, że osoby czerpiące motywację z wewnętrznej potrzeby znacznie częściej deklarują wzrost zaangażowania w rozwój osobisty w porównaniu ze studentami działającymi pod presją. Jedynie 4% badanych z pierwszej grupy stwierdziło, że obecnie poświęca mniej uwagi rozwojowi niż wcześniej, podczas gdy w przypadku drugiej grupy odsetek ten wyniósł 42%. Studenci działający pod wpływem presji mogą rzadziej czuć się zmotywowani, szczególnie w dłuższym okresie, takim jak czas studiów.

Zbadano również nastawienie badanych do efektywności własnego rozwoju. Rozkład odpowiedzi na pytanie: „Czy masz wrażenie, że stoisz w miejscu?”, przedstawia rysunek 10.

Czy masz wrażenie, że stoisz w miejscu?



Rys. 10. Rozkład odpowiedzi na pytanie: „Czy masz wrażenie, że stoisz w miejscu?”

Studenci podejmujący działania „dla siebie” w większości uważają, że ich rozwój jest efektywny. Tego zdania jest tylko 31% respondentów z drugiej grupy – działający pod presją częściej postrzegają swój rozwój jako niewystarczający, w wyniku czego mają wrażenie, że stoją w miejscu.

6. PODSUMOWANIE I WNIOSKI

Rozwój osobisty studentów jest złożonym procesem, a na jego przebieg i wydajność składają się różne czynniki zarówno wewnętrzne, jak i zewnętrzne. Aby samorozwój był efektywny, studenci powinni opanować umiejętności wyznaczania odpowiednich celów oraz budowania własnej motywacji. W procesie edukacyjnym mogą podążać różnymi ścieżkami według indywidualnych priorytetów. Z uwagi na różnorodność kierunków rozwoju podejmowanych przez studentów przeprowadzono badania mające na celu wyznaczenie zależności między ich celami a aktualnym etapem edukacji.

Rezultaty badań pokazują, że rozwój studentów ulega zmianom w trakcie kształcenia, a ich cele i wartości różnią się w zależności od etapu studiów. Studenci I stopnia biorą pod uwagę aspekty społeczne i częściej skłaniają się ku rozwijaniu swojego życia towarzyskiego. Z kolei podejście studentów II stopnia jest bardziej ukierunkowane na zdobywanie kompetencji oraz umiejętności praktycznych, przydatnych w nadchodzącej karierze zawodowej. Niektóre wartości, takie jak poszerzanie wiedzy teoretycznej, pozostają równie istotne na każdym etapie kształcenia.

Czynnikiem skłaniającym studentów do działania jest motywacja. Kluczowe jest zrozumienie źródła jej pochodzenia, ponieważ wpływa ona bezpośrednio na jakość rozwoju osobistego. Motywacja nie powinna wynikać z presji zewnętrznej, ponieważ badania wskazują, że oddziałuje to negatywnie na samorozwój, często powoduje wśród ulegających jej osób spadek determinacji oraz odczucie nieefektywności własnego rozwoju. Aby samorozwój był produktywny, motywacja powinna wynikać z wewnętrznej potrzeby jednostki. Jedynie świadome i zrównoważone dążenie do samorealizacji przyniesie zamierzone i trwałe rezultaty.

LITERATURA

- [1] Kukła D., *Między uczelnią a rynkiem pracy – perspektywy młodych*. Kultura i Wychowanie, t. 12, 2017, s. 85–94, https://cejsh.icm.edu.pl/cejsh/element/bwmeta1.element.ojs-doi-10_25312_2083-2923_12_2017_85-94 [dostęp: 19.02.2025].
- [2] Niemirowski T., *Pojęcie rozwoju w psychologii rozwojowej*, Horyzonty Psychologii, t. 5, nr 1, 2015, <https://journals.indexcopernicus.com/search/article?articleId=1742062> [dostęp: 19.02.2025].
- [3] Salamucha A., *Pojęcie rozwoju człowieka w pedagogice*, Roczniki Nauk Społecznych, t. 28–29, z. 2, 2001, <https://ojs.tnku.pl/index.php/rns/article/view/11027> [dostęp: 22.02.2025].
- [4] Geise A.C., *Personal growth and personality development: well-being and ego development*, University of Missouri Columbia, 2008, <https://doi.org/10.32469/10355/5667>.

- [5] Becker-Pestka D., Kołodziej J., Pujer K., *Rozwój osobisty i zawodowy: wybrane problemy teorii i praktyki*, Wydawnictwo Exante – Exante Conferences & Publications, 2017, <https://bibliotekanauki.pl/books/2010840.pdf> [dostęp: 16.02.2025].
- [6] American Psychological Association (APA), *Motivation*, [w:] *APA Dictionary of Psychology*, 2018, <https://dictionary.apa.org/motivation> [dostęp: 20.02.2025].
- [7] Locke E.A., Latham G.P., *New Directions in Goal-Setting Theory*, Current Directions in Psychological Science, vol. 15, iss. 5, 2006, s. 265–268, <https://doi.org/10.1111/j.1467-8721.2006.00449.x>.
- [8] Höpfner J., Keith N., *Goal Missed, Self Hit: Goal-Setting, Goal-Failure, and Their Affective, Motivational, and Behavioral Consequences*, Frontiers in Psychology, vol. 12, 2021, <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2021.704790>.
- [9] Maslow A.H., *A theory of human motivation*, Psychological Review, vol. 50, iss. 4, 1943, s. 370–396, <https://doi.org/10.1037/h0054346>.
- [10] Bergin A., Pakenham K., *Law Student Stress: Relationships Between Academic Demands, Social Isolation, Career Pressure, Study/Life Imbalance and Adjustment Outcomes in Law Students*, Psychiatry, Psychology and Law, vol. 22, iss. 3, 2015, s. 388–406, <https://doi.org/10.1080/13218719.2014.960026>.

Dorota Ślusarz*, Łukasz Wiwatowski*

KONSTRUKCJA I PRZEZNACZENIE AUTONOMICZNEGO WÓZKA TRANSPORTOWEGO SPINCART

W pracy opisano proces projektowania transportowego wózka AGV SpinCart. Szczególną uwagę zwrócono na odpowiednie cechy konstrukcji, tak aby był łatwy w montażu i konserwacji, a także spełniał wymagania funkcjonalne. Kluczowym elementem układu napędowego była przekładnia pasowa z pasem zębatym, zapewniająca efektywność energetyczną, trwałość i niezawodność dzięki eliminacji poślizgów. Opisano również układ skrętny, bazujący na mechanizmie z silnikiem krokowym i przekładnią zębatą, umożliwiający precyzyjne sterowanie kierunkiem jazdy, na wzór systemów stosowanych w pojazdach samochodowych. Dzięki zastosowaniu nowoczesnych narzędzi inżynierskich opracowano modele komputerowe autonomicznego wózka transportowego SpinCart, wykonano prototyp oraz przeprowadzono analizy, które potwierdziły zgodność projektu z założeniami.

DESIGN AND PURPOSE OF THE SPINCART AUTONOMOUS TRANSPORT TROLLEY

This paper describes the design process of the AGV SpinCart transport trolley. It looked at the appropriate features of the design so that it was easy to install and maintain, as well as meeting functional requirements. A key component of the drive system was the toothed belt transmission, which provides energy efficiency, durability and reliability by eliminating slip-page. A torsion system, based on a mechanism with a stepper motor and a toothed gear, was also described, allowing precise directional control, modelled on systems used in automotive vehicles. Thanks to the use of modern engineering tools, computer models were developed, a prototype was made, and analyses were carried out to confirm that the design was as intended.

1. WSTĘP

Roboty to sztuczne urządzenia stworzone przez człowieka, które mogą zastępować go w wykonywaniu określonych czynności. Ich funkcjonalność, sposób działania oraz rodzaj wykonywanych czynności zależą wyłącznie od projektanta. Poszczególne roboty są przystosowane do

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

realizacji różnych działań, dzięki czemu mogą być bardzo użyteczne, niezależnie od rodzaju procesu produkcyjnego. Roboty potrafią nie tylko operować różnymi przedmiotami, narzędziami i innymi urządzeniami, ale również pełnią funkcję transportową, dostarczając je z miejsca na miejsce. Urządzeniem, które jest zdolne do zmiany swojego położenia w przestrzeni, jest robot mobilny. Wykonuje on takie czynności jak jeżdżenie, pływanie, a nawet latanie [1].

W dobie dynamicznego rozwoju automatyzacji i robotyzacji wszelkich procesów logistycznych coraz większą rolę odgrywają autonomiczne systemy transportowe. W zakładach produkcyjnych i magazynach stosuje się nowoczesne rozwiązania wspierające transport wewnętrzny [2]. Wśród tych rozwiązań szczególnie miejsce zajmują autonomiczne wózki transportowe.

Jednym z innowacyjnych projektów w tej tematyce jest SpinCart, czyli samojezdny pojazd stworzony z myślą o usprawnieniu logistyki wewnętrznej, redukcji kosztów (np. operacyjnych) oraz zwiększeniu efektywności pracy.

Prototyp został wytworzony z materiałów i komponentów wybranych na podstawie wcześniejszych analiz i obliczeń inżynierskich, których celem było zapewnienie odpowiedniej wytrzymałości i funkcjonalności w realnych warunkach eksploatacyjnych. W ramach realizacji projektu wykonano również obliczenia inżynierskie dotyczące napędu wózka, w tym analizę momentu obrotowego, dobór odpowiednich przekładni oraz określenie parametrów napędu w celu zapewnienia odpowiedniej mocy i efektywności przenoszenia napędu. Dodatkowo przeprowadzono obliczenia zakresu skrętu kół, uwzględniając parametry układu skrętnego, kąt skrętu oraz wymagane siły do precyzyjnego sterowania pojazdem.

W niniejszym artykule podjęto temat konstrukcji oraz przeznaczenia autonomicznego wózka transportowego SpinCart. Omówione zostały jego podzespoły, zasada działania, a także technologie umożliwiające autonomiczną pracę w przestrzeni roboczej. Ponadto zostały przedstawione potencjalne obszary zastosowania tego pojazdu oraz korzyści, jakie może on przynieść przedsiębiorstwom, które dążą do zwiększenia automatyzacji i optymalizacji procesów logistycznych.

2. ZASTOSOWANIE I FUNKCJONALNOŚĆ AUTONOMICZNEGO WÓZKA TRANSPORTOWEGO SPINCART

Autonomiczny wózek transportowy SpinCart to urządzenie, które zmienia swoje położenie, poruszając się po wyznaczonej mu trasie. Zaletą tego rodzaju pojazdów jest brak ograniczeń spowodowanych przewodami sterującymi. Jedynymi przeszkodami, które wpływają na pracę autonomicznych wózków transportowych, są ściany i inne elementy materialne znajdujące się w pobliżu urządzenia [3].

Autonomiczne wózki mobilne nie wymagają budowy żadnego toru, który wskazywałby im drogę, po której mają się poruszać (rys. 1). Trasa zostaje dla takiego urządzenia zaprogramowana wcześniej, dzięki czemu praca wózka nie wymaga bezpośredniej ingerencji operatora [2]. Na takiej właśnie zasadzie działa model SpinCart. Znajdzie on swoje zastosowanie w zakładach produkcji bądź w magazynach, gdzie będzie przewoził różne materiały i narzędzia z miejsca na miejsce.



Rys. 1. Autonomiczne wózki transportowe wykorzystywane w magazynie [4]

Aby autonomiczny wózek transportowy mógł się przemieszczać, należy mu zaprogramować mapę, która będzie przedstawiać cały obszar roboczy pojazdu. Dzięki temu w trakcie pracy wózka nie jest wymagana żadna ingerencja operatora [4], co wpływa korzystnie na efektywność działania przedsiębiorstwa [5]. Pozwala na znaczną optymalizację liczby pracowników – operatorów wózków transportowych, a co za tym idzie, także kosztów oraz usprawnia logistykę wewnętrzną. Dzięki wbudowanym elementom takim jak kamery 3D i liczne czujniki autonomiczne wózki transportowe potrafią także na bieżąco dostosowywać trasę do zaistniałych potrzeb. Są one w stanie wykrywać inne obiekty, które nie zostały uwzględnione we wcześniej zaprogramowanej mapie, a także przemieszczających się ludzi.

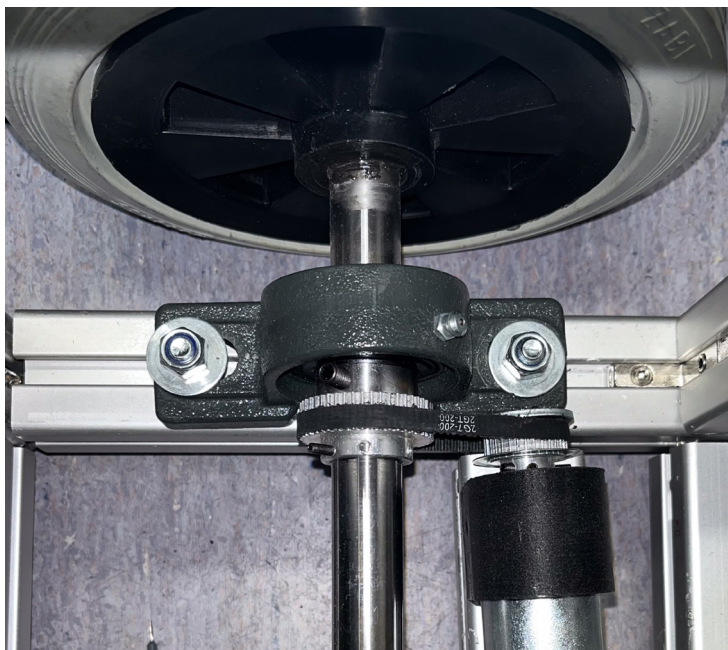
Ładunkiem, jaki może być transportowany przez roboty autonomiczne, są narzędzia, inne urządzenia, palety lub inne wyroby. Taki wózek jest rozwiązaniem stosowanym w magazynach do przewozu ciężkich elementów, gdyż robi to sprawnie i nie jest wymagane zaangażowanie człowieka [3].

3. ANALIZA NOŚNOŚCI, WYTRZYMAŁOŚCI I KONSTRUKCJI ORAZ DOBÓR MATERIAŁÓW DO WYKONANIA MODELU

Pierwszym etapem opracowania struktury całej ramy i układu zawieszenia była analiza wymagań nośności, sztywności i wytrzymałości konstrukcji – było to niezbędne do doboru odpowiedniego materiału. Ostatecznie materiałem, który wykorzystano do konstrukcji ramy autonomicznego wózka transportowego SpinCart, zostało aluminium. Zdecydowano się na konstrukcję aluminiową, ponieważ ze względu na właściwości mechaniczne zapewniała stabilność podczas manewrowania [6], okazała się również najlepszym rozwiązaniem w ramach założonego budżetu. Jednocześnie przeprowadzono analizy geometryczne i wytrzymałościowe, aby zoptymalizować strukturę ramy pod kątem minimalizacji masy przy zachowaniu wymaganej wytrzymałości. Ważnym aspektem było również dostosowanie konstrukcji ramy do integracji z pozostałymi układami, w szczególności z systemem napędowym i sterującym.

3.1. UKŁAD NAPĘDOWY POJAZDU

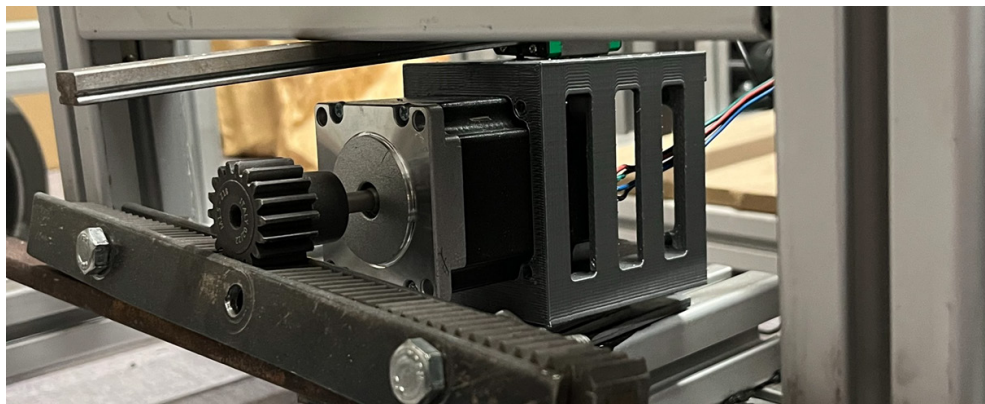
Układ napędowy oparty został na przekładni pasowej z pasem zębatym, który wybrano ze względu na jego zalety, takie jak efektywne przenoszenie momentu obrotowego, minimalizacja ryzyka poślizgów oraz niski poziom hałasu. Układ ten został zaprojektowany w taki sposób, aby zapewnić płynne działanie i odpowiednią dynamikę pojazdu. W ramach tego etapu przeprowadzono szczegółowe obliczenia, które pozwoliły dobrać odpowiednie parametry przekładni, w tym przełożenia i napięcie pasa (rys. 2), niezbędne do zapewnienia niezawodności i efektywności energetycznej.



Rys. 2. System napędowy z dwoma silnikami elektrycznymi napędzającymi tylne koła
(fot. Dorota Ślusarz)

3.2. SYSTEM STEROWANIA POJAZDEM

Zdecydowano się na zastosowanie układu opartego na silniku krokowym, który pozwalał na precyzyjne sterowanie ruchem kół. Mechanizm ten został zrealizowany za pomocą systemu zębatego i prowadnicy liniowej (rys. 3), co umożliwiło dokładne przenoszenie sił sterujących na koła i zapewniło dużą precyzję manewrowania. Zastosowanie tego rozwiązania było inspirowane układami stosowanymi w pojazdach mechanicznych, co pozwoliło na przeniesienie sprawdzonych technologii do projektu pojazdu. System ten został zoptymalizowany pod kątem zapewnienia niezawodności oraz minimalizacji zużycia komponentów podczas eksploatacji.



Rys. 3. System przednich kół skrętnych oparty na silniku krokowym i listwie zębatej
(fot. Dorota Ślusarz)

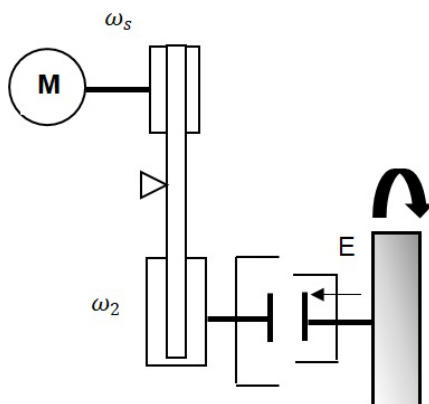
4. DOBÓR SILNIKÓW DO WÓZKA JEZDNEGO AGV

Założenia projektowe przedstawiono w tabeli 1.

Tabela 1. Wstępnie założone wartości parametrów

Nazwa	Wartość
Prędkość liniowa wózka	$v = 1,5 \text{ m/s}$
Średnica koła jezdnego	$D = 8 \text{ cali} \approx 200 \text{ mm}$
Średnica felgi koła jezdnego	$D_f = 160 \text{ mm}$
Liczba kół	$k = 4$
Liczba silników	$M = 2$
Masa wózka	$m_w = 20 \text{ kg}$
Maksymalny ładunek	$m_l = 20 \text{ kg}$
Wysokość wózka	$H = 0,5 \text{ m}$
Długość wózka	$L = 1 \text{ m}$
Szerokość wózka	$S = 0,8 \text{ m}$

Stworzono uproszczony schemat układu napędowego wózka (rys. 4).



Rys. 4. Uproszczony schemat układu napędowego.

Objaśnienia: M – silnik, źródło napędu mechanicznego, ω_s – prędkość kątowna wału silnika, ω_2 – prędkość kątowna drugiego koła, E – napięcie zasilające sprzęgło elektromagnetyczne

4.1. OBLICZENIA WSTĘPNE

Obliczenie zapotrzebowania na moc do pokonania oporów wynikających z tarcia (rys. 4) wykonano w następujących krokach.

Całkowite obciążenie wózka obliczono ze wzoru:

$$Q = g \cdot (m_w + m_t) = 9,81 \cdot (20 + 20) = 392,4 \text{ N}$$

gdzie:

Q – ciężar [N],

g – przyspieszenie ziemskie [m/s^2]

m – masa [kg].

Obliczono nacisk wózka na jedno koło:

$$N = \frac{1}{4} \cdot Q = 98,1 \text{ N}$$

Obliczono siłę tarcia tocznego:

$$F_t = \frac{N \cdot f}{R} = \frac{98,1 \cdot 15}{100} = 14,72 \text{ N}$$

gdzie:

R – średnica koła jezdneho, $R = 100 \text{ mm}$,

f – współczynnik tarcia tocznego [-].

Obliczono moment siły tarcia tocznego:

$$M_t = f \cdot N = 0,015 \cdot 98,1 = 1,47 \text{ Nm}$$

gdzie:

M_t – moment tarcia tocznego [Nm],

f – współczynnik tarcia tocznego [-].

Obliczono rzeczywiste zapotrzebowanie na moc:

$$N_0 = F_t \cdot 4 \cdot v = 14,72 \cdot 4 \cdot 1,5 = 88,32 \text{ W}$$

$$N_1 = \frac{N_0}{2} = 44,16 \text{ W/silnik}$$

gdzie:

N_0 – zapotrzebowanie na moc [W],

F_t – siła tarcia [N],

v – prędkość [m/s].

Zakładając sprawność całkowitą układu napędowego na poziomie $\eta = 0,95$, otrzymano:

$$N = \frac{N_s}{\eta} \approx 46,5 \text{ W}$$

Obliczono prędkość kątową koła jezdnego:

$$\omega = \frac{v}{\frac{D}{2}} = \frac{2v}{D} = \frac{2 \cdot 1,5}{0,2} = 15 \text{ rad/s}$$

gdzie:

ω – prędkość kątowa koła jezdnego [rad/s],

v – prędkość [m/s],

D – średnica koła jezdnego [m].

Obliczono prędkość obrotową koła jezdnego:

$$n_k = \frac{60 \cdot v}{\pi \cdot D} = \frac{30 \cdot \omega}{\pi} = 143,24 \text{ obr/min} \approx 144 \text{ obr/min}$$

gdzie:

n_k – prędkość obrotowa koła jezdnego [obrotów/min],

ω – prędkość kątowa koła jezdnego [rad/s],

D – średnica koła jezdnego [m].

Tabela 2 przedstawia zestawienie parametrów pracy silnika w funkcji jego prędkości obrotowej, obejmujące moment obrotowy, napięcie zasilania, średnicę wału, przełożenie, masę oraz moc wyjściową, co stanowi podstawę do analizy charakterystyki mechanicznej badanego układu.

Tabela 2. Dane w zależności od liczby obrotów na minutę

Prędkość obrotowa n_s [obr/min]	Moment obrotowy M_s [Nm]	Napięcie U [V]	Średnica D [mm]	Przełożenie I	Masa m [kg]	Moc P [W]
200	2,26	24	6	50:1	0,19 kg	47
140	3,04	24	6	70:1	0,19	44
1000	0,54	24	6	50:1	0,19	56
540	0,93	24	7,8	19:1	0,19	52,59
330	1,47	24	7,8	30:1	0,19	50,8

Obliczono moc dobranego silnika:

$$N_s = \frac{M_s \cdot n_s}{9,550} \approx 47 \text{ W}$$

4.2. DODATKOWE ZAPOTRZĘBOWANIE NA MOC WYNIKAJĄCE Z OPORÓW POWIETRZA

W celu oszacowania dodatkowego zapotrzebowania na moc wynikającego z oporów aerodynamicznych wykonano następujące obliczenia.

Pole powierzchni czołowej pojazdu obliczono ze wzoru:

$$A = S \cdot H = 0,8 \cdot 0,5 = 0,4 \text{ m}^2$$

gdzie:

A – pole powierzchni czołowej [m²],

S – szerokość pojazdu [m],

H – wysokość pojazdu [m].

Dobrano współczynnik oporu aerodynamicznego C_x .

Założono, że składowa wektora siły aerodynamicznej jest równoległa i normalna do kierunku ruchu wózka, a jej zwrot jest przeciwny do kierunku ruchu wózka. Założono również, że rozpatrywany przekrój, w którym występują największe opory aerodynamiczne, jest

prostokątem, którego pole jest równe iloczynowi wysokości i szerokości wózka (rys. 5). Założono pracę wózka w temperaturze około 20°C oraz wilgotności powietrza RH = 60%. W takich warunkach gęstość powietrza $\rho = 1,2 \text{ kg/m}^3$.

Shape		Drag Coefficient
Sphere		0.47
Half-sphere		0.42
Cone		0.50
Cube		1.05
Angled Cube		0.80
Long Cylinder		0.82
Short Cylinder		1.15
Streamlined Body		0.04
Streamlined Half-body		0.09

Measured Drag Coefficients

Rys. 5. Współczynniki oporu w zależności od kształtu

Źródło: https://pl.m.wikipedia.org/wiki/Wsp%C3%B3%C5%82czynnik_oporu_aerodynamicznego [dostęp: 3.03.2025]

Dobrano współczynnik aerodynamiczny $C_x = 0,82$.

Siłę oporu powietrza obliczono ze wzoru:

$$F_{op} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot C_x \cdot A \cdot v^2 = 0,44 \text{ N}$$

gdzie:

- F_{op} – siła oporu powietrza [N],
- ρ – gęstość powietrza [kg/m^3],
- A – powierzchnia czołowa pojazdu [m^2],
- v – prędkość [m/s].

Siła oporu jest niewielka, dlatego założono, że nie ma dodatkowego zapotrzebowania na moc silnika, niezbędną do pokonania oporów aerodynamicznych, czyli $M_{op} = 0$.

Moment obrotowy silnika obliczono z zależności:

$$M_s = M_{stat} + M_D + M_{op}$$

gdzie:

M_{stat} – moment statyczny odpowiadający za moment obrotowy wymagany do pokonania oporu statycznego, który musi być dostarczany przez silnik nawet wtedy, gdy nie ma zmian prędkości obrotowej;

M_D – moment dynamiczny potrzebny do przyspieszania obrotowego kół jezdnych wózka i pokonywania oporu dynamicznego, takiego jak opór powietrza i opory tarcia w ruchu; jest to moment obrotowy, który zmienia się wraz z prędkością obrotową silnika i prędkością liniową wózka.

Z zasady zachowania mocy układu, przy założeniu, że prędkość kątowna wału silnika jest stała: $\omega_s = \text{const}$, obliczono moment obrotowy konieczny do jej utrzymania:

$$M_{stat} \cdot \omega_s = N_s$$

$$\omega_s = \frac{\pi \cdot n_s}{30} = 21 \frac{\text{rad}}{\text{s}}$$

$$M_{stat} = \frac{N_s}{\omega_s} = 2,24 \text{ Nm}$$

Przyjmujemy, że prędkość kątowna wału silnika jest zmienna w czasie i różna od 0:

$$\omega_s \neq \text{const} \text{ oraz } \omega_s \neq 0$$

5. SYSTEM STEROWANIA

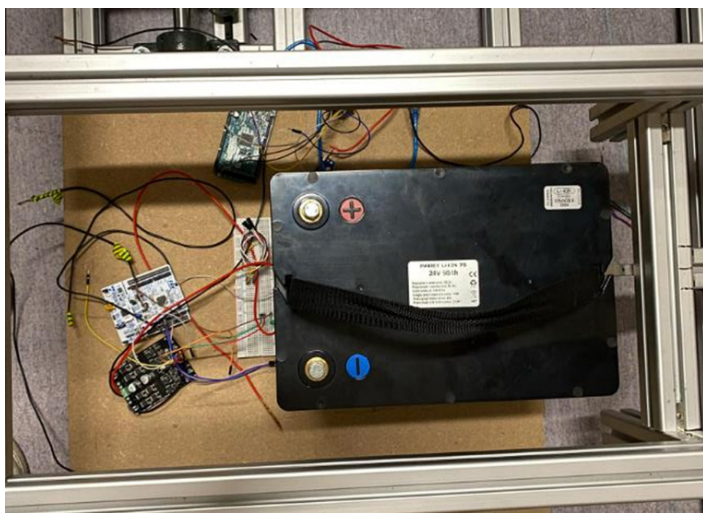
W ramach projektu opracowano układ automatyki i elektrotechniki dla wózka AGV, zaprojektowanego z myślą o zastosowaniach transportowych w środowisku przemysłowym. System sterowania oparto na mikrokontrolerze STM32, który pełnił funkcje centralnego układu przetwarzającego, zarządzającego wszystkimi sygnałami sterującymi i obsługującego algorytmy komunikacji z pozostałymi elementami systemu.

W celu zapewnienia funkcjonalności nawigacyjnej wózek wyposażono w czujniki LIDAR oraz TOF. Ich głównym zadaniem była detekcja otoczenia i dostarczanie informacji potrzebnych do realizacji zaawansowanych algorytmów sterowania. System sterowania został zrealizowany w dwóch wariantach:

- 1) lokalny system sterowania obsługiwany przez panel kontrolny zamontowany na wózku, umożliwiający ręczne zarządzanie ruchem wózka,
- 2) bezprzewodowy system sterowania, który pozwalał na zdalne zarządzanie funkcjami wózka i umożliwiał większą elastyczność w jego użytkowaniu.

Opracowano także mechanizm synchronizacji sygnałów sterujących. Mikrokontroler STM32, pracując w trybie przerwań, monitorował sygnały wejściowe z panelu sterowania z częstotliwością 10 Hz. Było to istotne, ponieważ komputer nadrzędny wymagał regularnych danych o stanie układu, co gwarantowało prawidłowe funkcjonowanie całego systemu.

Dokładne obliczenia energetyczne pozwoliły dobrać odpowiedni akumulator litowo-jonowy o parametrach 7S, 50 Ah, 24 V, wyposażony we wbudowany system zarządzania baterią (BMS, *Battery Management System*). Akumulator ten zapewnia wystarczającą wydajność energetyczną, by sprostać wymaganiom systemu (rys. 6) [7].



Rys. 6. Akumulator litowo-jonowy (fot. Łukasz Wiwatowski)

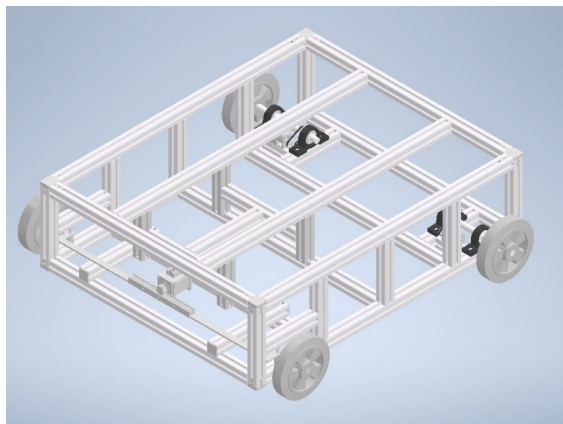
Zostały też zastosowane wszelkie zabezpieczenia elektryczne, takie jak bezpieczniki i przełączniki, które chroniły układ przed przeciążeniami oraz możliwymi uszkodzeniami elementów systemu.

6. MODELOWANIE KOMPONENTÓW I KONSTRUKCJA MODELU AUTONOMICZNEGO WÓZKA TRANSPORTOWEGO SPINCART

6.1. MODELOWANIE KOMPONENTÓW

Po zakończeniu etapu koncepcyjnego zespół przystąpił do modelowania wszystkich komponentów pojazdu przy użyciu oprogramowania CAD 3D (rys. 7). Dzięki wykorzystaniu tej technologii możliwe było dokładne odwzorowanie geometrii poszczególnych elementów oraz sprawdzenie ich wzajemnej kompatybilności. Modelowanie w środowisku wirtualnym pozwoliło także na szybkie wykrywanie potencjalnych problemów konstrukcyjnych oraz ich eliminację na etapie projektowania, co znacznie obniżyło ryzyko wystąpienia błędów podczas montażu. Jednocześnie przeprowadzono liczne analizy inżynierskie, w tym analizę

momentu obrotowego, dobór przełożeń, analizę zakresu skrętu kół oraz wytrzymałości ramy na obciążenia dynamiczne. Uzyskane wyniki pozwoliły na weryfikację projektu pod kątem wydajności, niezawodności oraz efektywności kosztowej.

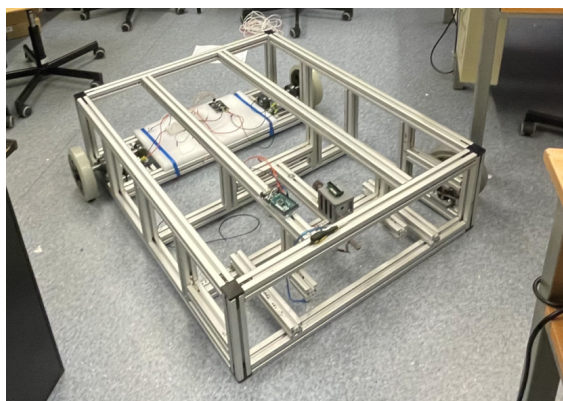


Rys. 7. Model projektu SpinCart przy wykorzystaniu programu Autodesk Inventor 2024

6.2. KONSTRUKCJA I PARAMETRY AUTONOMICZNEGO WÓZKA TRANSPORTOWEGO SPINCART

Po wykonaniu projektu końcowego zespół przeszedł do etapu konstrukcji modelu autonomicznego wózka transportowego SpinCart (rys. 8). Skupiono się na precyzyjnym wykonaniu poszczególnych części zgodnie z projektem.

Liczne elementy konstrukcyjne wykonane zostały w technologii wytwarzania FDM (*Fused Deposition Modeling*).

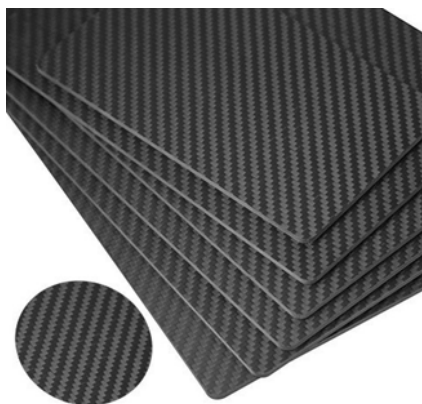


Rys. 8. Efekt końcowy konstrukcji ramy

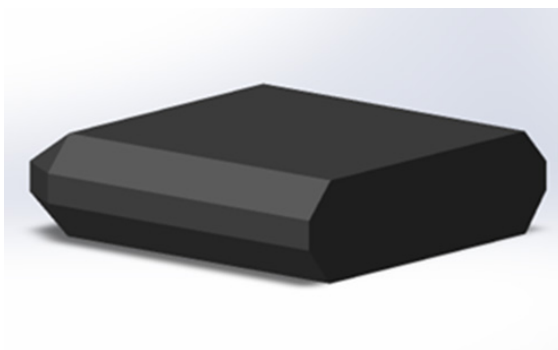
7. OSŁONA DLA WÓZKA AGV

Osłona dla wózka miała spełniać zarówno wymagania estetyczne, jak i przede wszystkim funkcjonalne. Miała bowiem zapewnić ochronę elementów wewnętrznych wózka, a jednocześnie być trwałą. Kolejnym parametrem konstrukcji badanym przez zespół projektowy była sztywność osłony zapewniająca jednocześnie lekkość elementu. Idealnym rozwiązaniem łączącym wytrzymałość wraz z lekkością konstrukcji jest laminat włókna węglowego.

Włókno węglowe to wyjątkowy materiał o bardzo wysokiej wytrzymałości mechanicznej i jednocześnie niskiej masie (rys. 9). Jego gęstość wynosi zaledwie $1,8 \text{ g/cm}^3$, co czyni je znacznie lżejszym od stali czy aluminium, a jednocześnie przewyższa je pod względem wytrzymałości na rozciąganie (nawet do 5300 MPa). Dzięki temu pojazdy wykonane z włókna węglowego mogą przenosić większe obciążenia, pozostając lekkie i wydajne. Zastosowanie włókna węglowego w pojazdach autonomicznych pozwala na budowę bardziej ekonomicznych, szybszych i ekologicznych konstrukcji (rys. 10) [8].



Rys. 9. Laminat włókna węglowego



Rys. 10. Model CAD osłony

Zastosowanie włókna węglowego w projekcie wymagało od zespołu zmierzenia się ze zjawiskiem korozji galwanicznej. Występuje ona wtedy, gdy włókno węglowe w kontakcie z metalem tworzy ogniwo galwaniczne, co prowadzi do przyspieszonego utleniania metalu. Jest to spowodowane różnicą potencjałów elektrochemicznych między włóknem węglowym (będącym przewodnikiem) a metalem, szczególnie w obecności elektrolitu, np. wody. Aby zapobiec korozji galwanicznej w konstrukcjach łączących włókno węglowe z metalami, stosuje się specjalne łączniki izolacyjne.

8. PODSUMOWANIE

W niniejszym artykule omówiono konstrukcję oraz zastosowanie autonomicznego wózka transportowego SpinCart. Odpowiednie obliczenia pozwoliły na precyzyjne wykonanie projektu urządzenia tak, aby posiadał on prawidłowe parametry wytrzymałościowe i jednocześnie niską wagę. Wykorzystując nowoczesne technologie, stworzono optymalną konstrukcję wózka, a także zaprogramowano go tak, żeby możliwa była zmiana jego położenia bez ingerencji operatora.

Trudnością, jaka pojawiła się w trakcie realizacji projektu, był brak możliwości przeprowadzenia testów funkcjonalnych układu napędowego, układu sterowania oraz wytrzymałości ramy, co opóźniło weryfikację kluczowych założeń technicznych w praktycznych warunkach. Dodatkowo prototyp wózka nie został ukończony zgodnie z harmonogramem, co uniemożliwiło przeprowadzenie pełnych testów funkcjonalnych i wymusiło przesunięcie ich na kolejne etapy. Nie miało to jednak wpływu efekt końcowy.

Dzięki możliwościom, jakie oferuje SpinCart, znajduje on szerokie zastosowanie w zakładach przemysłowych i magazynach. Wykorzystanie autonomicznych wózków pozwala na redukcję kosztów pracy i poprawę efektywności procesów logistycznych. Opisana konstrukcja wpisuje się w trendy Przemysłu 4.0, promujące automatyzację i cyfryzację procesów produkcyjnych. Odpowiednie zarządzanie transportem wewnętrznym może zapewniać ciągłość produkcji przy zachowaniu wysokiej jakości, dostarczać surowce i komponenty dokładnie na czas. Dalszy rozwój technologii autonomicznych pojazdów transportowych może znacząco zwiększyć wydajność i bezpieczeństwo w nowoczesnych zakładach przemysłowych [9].

LITERATURA

- [1] Śmieszek M., *Wykorzystanie środków automatycznego transportu w logistyce*, Zeszyty Naukowe. Organizacja i Zarządzanie/Politechnika Śląska, z. 99, 2016, s. 533–543.
- [2] Bednarz P., Popiel J., *Roboty AGV w intralogistyce-teraźniejszość i wyzwania na przyszłość*, Zeszyty Naukowe Szkoły Głównej Gospodarstwa Wiejskiego w Warszawie. Ekonomia i Organizacja Logistyki, 3(4), 2018, <https://doi.org/10.22630/EIOL.2018.3.4.25>.
- [3] Surma A., *Roboty mobilne AGV w procesach kompletacji towarów*, Journal of Trans-Logistics, vol. 6(1), 2020, s. 221–231.
- [4] Zubrzycki J., *Roboty mobilne. Workbook*, Politechnika Lubelska, Lublin 2021, <https://hdl.handle.net/20.500.14629/11876>.

- [5] Hyla P., Szpytko J., Rumin R., Cieślik J., Blaut J., *Autonomiczne jednostki transportowe AGV w transporcie technologicznym*, Autobusy: Technika, Eksploatacja, Systemy Transportowe, t. 20(1–2), 2019, s. 375–382, <https://doi.org/10.24136/atest.2019.070>.
- [6] Białobrzeski, A., Czekał E., Heller M., *Właściwości korozyjne stopów aluminium i magnezu przetwarzanych technologią odlewania ciśnieniowego*, Archiwum Odlewnictwa, t. 2(4), 2002, s. 294–313.
- [7] Knura R., Pacek J., *Akumulatory litowo-jonowe stosowane w przemyśle motoryzacyjnym*, Wiadomości Chemiczne, t. 72(3–4), 2018, s. 185–205.
- [8] Gibas E., *Polimery i dodatki przewodzące*, Przetwórstwo Tworzyw, t. 22(6), 2016, s. 516–529.
- [9] Kołata D., *Automatyzacja procesów logistycznych – fanaberia czy konieczność?*, Logistyka, t. 1, 2021, s. 64–68.

BADANIE PROCESU RAFINACJI PARAFINY Z WYKORZYSTANIEM ZIEM FILTRACYJNYCH: WPŁYW SKŁADNIKÓW CHEMICZNYCH NA JAKOŚĆ PRODUKTU KOŃCOWEGO

Proces rafinacji parafiny odgrywa kluczową rolę w poprawie jakości i użyteczności wyrobu końcowego w różnych zastosowaniach przemysłowych. Badania koncentrują się na wykorzystaniu ziem filtracyjnych w procesie rafinacji parafiny, ze szczególnym uwzględnieniem wpływu ich składników chemicznych na efektywność oczyszczania i jakość rafinowanego produktu. W pracy przeanalizowano, jak konkretne związki obecne w ziemiach filtracyjnych wpływają na usuwanie zanieczyszczeń, odbarwianie i ogólną skuteczność procesu rafinacji. Przedstawiono analizę składu chemicznego ziem filtracyjnych oraz ich wpływ na kluczowe parametry, tj. czystość parafiny, jej barwę i stabilność strukturalną. Przeprowadzono eksperymenty laboratoryjne oraz analizy porównawcze w celu identyfikacji związków chemicznych, które w największym stopniu poprawiają efektywność procesu rafinacji. Ponadto omówiono strategie optymalizacji mające na celu zwiększenie wydajności procesu i jakości produktu końcowego, wskazując na możliwości zastosowań przemysłowych.

PARAFFIN REFINING PROCESS USING FILTER SOILS: INFLUENCE OF CHEMICAL COMPONENTS ON THE QUALITY OF THE FINAL PRODUCT

The paraffin refining process plays a key role in improving the quality and usability of the final product for a variety of industrial applications. This study focuses on the use of bleaching earths in the paraffin refining process, with particular attention to the impact of their chemical components on the purification efficiency and quality of the refined paraffin. The study analyzed how specific compounds present in bleaching earths, affect the removal of contaminants, discoloration, and overall efficiency of the refining process. The paper presents a detailed analysis of the chemical composition of different types of bleaching earths and their influence on key parameters such as the purity of paraffin, its color and structural stability. Optimization strategies to increase the process efficiency and the quality of the final product were also discussed, pointing to the possibilities for industrial applications.

1. WSTĘP

Odzyskiwanie surowców to jeden z najważniejszych elementów zrównoważonego rozwoju i efektywnego zarządzania zasobami w nowoczesnym przemyśle. W dobie rosnącej świadomości ekologicznej oraz konieczności ograniczenia zużycia surowców pierwotnych

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

coraz większą uwagę poświęca się technologiom umożliwiającym ponowne wykorzystanie materiałów, w tym również parafiny. Rafinacja, jako proces technologiczny umożliwiający oczyszczanie i regenerację substancji, odgrywa kluczową rolę w recyklingu parafiny, przyczyniając się zarówno do obniżenia kosztów produkcji, jak i minimalizacji wpływu na środowisko naturalne.

Parafina jest surowcem znajdującym zastosowanie w wielu branżach, takich jak przemysł świecowo-zniczowy, kosmetyczny, farmaceutyczny, spożywczy czy chemiczny. Z tego względu rośnie zapotrzebowanie na metody umożliwiające jej efektywne odzyskiwanie i oczyszczanie. Rafinacja parafiny polega na usuwaniu zanieczyszczeń organicznych i nieorganicznych oraz poprawie jej właściwości fizykochemicznych, co pozwala na ponowne jej wykorzystanie bez konieczności sięgania po nowe surowce. W efekcie prowadzi to do redukcji kosztów operacyjnych w przedsiębiorstwach, a także przyczynia się do ochrony zasobów naturalnych i ograniczenia odpadów przemysłowych.

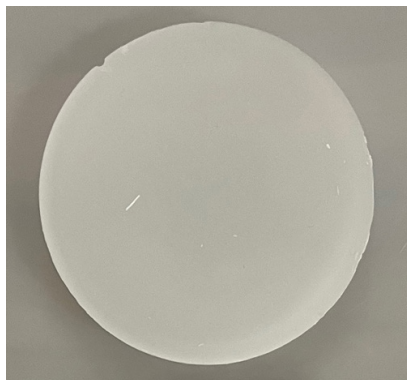
Optymalizacja procesów rafinacji parafiny stanowi zasadniczy element strategii wielu przedsiębiorstw dążących do zwiększenia swojej konkurencyjności na rynku. Dzięki ulepszaniu metod oczyszczania, doborowi odpowiednich adsorbentów i optymalizacji parametrów procesowych możliwe jest uzyskanie wysokiej jakości produktu przy jednoczesnym ograniczeniu zużycia energii i środków chemicznych. Wdrożenie efektywnych technologii rafinacji nie tylko poprawia opłacalność produkcji, ale również pozwala firmom na dostosowanie się do coraz bardziej restrykcyjnych norm środowiskowych i jakościowych, które mają istotne znaczenie w wielu sektorach przemysłu.

2. PODSTAWOWE INFORMACJE O PROBLEMIE BADAWCZYM

Parafina jest to mieszanina stałych węglowodorów nasyconych, uzyskiwana w procesie rafinacji ropy naftowej. Jest substancją bezbarwną lub białą, pozbawioną smaku i zapachu, a jej dotknięcie pozostawia na skórze charakterystyczny tłusty film. Parafina nie rozpuszcza się w wodzie ani w alkoholu etylowym, natomiast dobrze rozpuszcza się między innymi w benzynie i heksanie.

Proces rafinacji parafiny obejmuje wiele metod chemicznych, takich jak odbarwianie za pomocą adsorbentów oraz frakcjonowanie przy użyciu destylacji i rekrystalizacji. Właściwości chemiczne tej substancji sprawiają, że woski parafinowe są amorficzne i obojętne, co oznacza, że nie zawierają aktywnych grup funkcyjnych. Dzięki temu parafina charakteryzuje się wysoką stabilnością chemiczną i nie wchodzi łatwo w reakcje z innymi substancjami. Z powodu tych właściwości parafina znajduje szerokie zastosowanie zarówno w przemyśle, jak i życiu codziennym – na przykład w kosmetyce, farmacji, przemyśle spożywczym oraz produkcji świec i izolatorów elektrycznych [1, 2].

Na rysunku 1 przedstawiono czystą parafinę, którą barwiono z użyciem barwnika czerwonego. Podczas procesu rafinacji oczekiwano, że uda się otrzymać próbkę wyjściową.



Rys. 1. Parafina czysta (biała)

3. ZASTOSOWANIA PARAFINY

Parafina znajduje zastosowanie w produkcji świec oraz zniczy – zarówno o charakterze użytkowym, jak i dekoracyjnym. Ze względu na swoje właściwości chemiczne i fizyczne dobrze miesza się z barwnikami oraz olejkami eterycznymi, co umożliwia uzyskanie szerokiej gamy kształtów, kolorów oraz zapachów. Ponadto właściwości fizykochemiczne parafiny przyczyniają się do jej wysokiej efektywności spalania, co sprawia, że świece i znicze parafinowe palą się dłużej.

Ze względu na swoje wszechstronne właściwości parafina znalazła zastosowanie w licznych gałęziach przemysłu i życia codziennego. W sektorze kosmetycznym odgrywa kluczową rolę jako składnik pomadek, balsamów, kremów oraz szminek, zapewniając skórze warstwę ochronną i ograniczając utratę wilgoci. W medycynie natomiast stosuje się ją w terapii parafinowej, wykorzystywanej do łagodzenia dolegliwości reumatycznych oraz poprawy elastyczności stawów. Ponadto parafina jest używana w niektórych procedurach chirurgicznych oraz rehabilitacyjnych.

Istotnym obszarem wykorzystania parafiny jest także przemysł spożywczy. Substancja ta jest stosowana jako składnik powłok ochronnych nakładanych na warzywa i owoce. Tworzy ona barierę fizyczną, ograniczając parowanie wody, a jednocześnie reguluje skład atmosfery gazowej otaczającej produkt. Efektem tego jest spowolnienie procesów utleniania oraz wydłużenie okresu przydatności do spożycia.

4. ADSORBENTY STOSOWANE W RAFINACJI PARAFINY

W procesie rafinacji parafiny wyróżnia się dwa główne adsorbenty, które są stosowane przemysłowo. Są to węgiel aktywny oraz ziemie okrzemkowe aktywowane chemicznie. Ziemie wykorzystywane w procesie rafinacji to związki glinokrzemianowe o szerokim spektrum barw – od rudawych po szarawe. Można zatem wywnioskować, że te ziemie różnią się swoim składem chemicznym, a podczas ich aktywowania kwasami takimi jak HCl lub H_2SO_4

otrzymujemy wiele ich rodzajów o różnych zdolnościach adsorpcyjnych – w zależności od tego, co zostało rozpuszczone w kwasie i jaką strukturę pozostawiło po sobie w ziemi (strukturę porowatą).

Głównymi związkami chemicznymi znajdującymi się w ziemiach okrzemkowych stosowanych przemysłowo do procesu rafinacji parafiny są:

- SiO_2 – tlenek krzemu (około 60% składu),
- MgO – tlenek magnezu (około 15%),
- Al_2O_3 – tlenek glinu (około 8%),
- Fe_2O_3 – tlenek żelaza (około 7%),
- CaO – tlenek wapnia (około 4%),
- inne (około 6%).

5. CEL I ZAKRES BADAŃ

Celem badań jest szczegółowa analiza składu chemicznego ziem okrzemkowych oraz ocena ich efektywności w procesie rafinacji parafiny. Szczególny nacisk zostanie położony na identyfikację oraz charakterystykę obecnych w nich związków chemicznych, które mogą wpływać na skuteczność procesu oczyszczania. Dąży się do określenia potencjalnego wpływu składu mineralnego ziem okrzemkowych na właściwości uzyskiwanej parafiny, w tym jej czystość chemiczną oraz parametry fizykochemiczne.

Realizacja zadania polega na wykonaniu badań laboratoryjnych z wykorzystaniem różnych rodzajów związków chemicznych występujących w ziemiach okrzemkowych, zgodnie ze standardowymi procedurami rafinacji parafiny.

Istotą problemu badawczego jest uzyskanie odpowiedzi na pytanie, czy można syntetycznie odtworzyć ziemię bielącą dostępną na rynku za pomocą związków chemicznych w niej występujących, aby ulepszyć proces rafinacji oraz obniżyć jego koszty.

Wykonane badania miały charakter praktyczny. Służyły do znalezienia optymalnej mieszanki związków, która każdorazowo dawałaby doskonały efekt w procesie rafinacji parafiny. Eksperymenty stanowią wstęp do głębszej analizy, którą można będzie przeprowadzić w przypadku uzyskanych zadowalających wyników.

6. METODY BADAWCZE

Program badań obejmuje proces rafinacji, w którym wykorzystano roztwory białej parafiny (czystej) z dodatkiem barwnika przemysłowego w kolorze czerwonym o stężeniu 0,1% masy parafiny. W celu odwzorowania optymalnych warunków procesu oczyszczania zastosowano syntetyczny odpowiednik ziemi okrzemkowej „Palmax”, która w dotychczasowych analizach przeprowadzonych w przedsiębiorstwie miała najwyższą skuteczność w usuwaniu zanieczyszczeń organicznych i nieorganicznych z parafiny.

W badaniach wykorzystano podstawowe związki chemiczne, które składają się na rzeczywisty skład mineralny ziemi okrzemkowej „Palmax”. Są to:

- ditlenek krzemu (SiO_2) – główny składnik strukturalny ziem okrzemkowych, odpowiadający za wysoką porowatość i zdolność adsorpcyjną,
- tlenek magnezu (MgO_3),
- tlenek glinu (Al_2O),
- tlenek żelaza (Fe_2O_3),
- tlenek wapnia (CaO).

Skład ten został precyzyjnie dobrany na podstawie wcześniejszych analiz składu mineralnego ziemi okrzemkowej „Palmax” – udostępnionego przez producenta – wykonanych za pomocą analizy spektroskopowej (rys. 2). Uzyskane wyniki pozwoliły na przeprowadzenie kontrolowanych eksperymentów w warunkach laboratoryjnych. Celem badań było określenie efektywności poszczególnych komponentów w procesie oczyszczania parafiny oraz ocena wpływu zastosowanego adsorbentu na końcową jakość produktu. W tabeli 1 przedstawiono skład ziemi „Palmax” uzyskany analizą spektroskopową oraz związki chemiczne, z których otrzymano jej syntetyczny odpowiednik.



Rys. 2. Związki chemiczne wykorzystane do badań: SiO_2 , MgO , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , CaO

Tabela 1. Tabela składu chemicznego ziemi „Palmax”

Składnik	Zawartość procentowa
SiO_2	59,94
Al_2O_3	9,18
Fe_2O_3	6,74
CaO	7,15
MgO	7,24
Na_2O	0,19
K_2O	0,99
SO_4	2,57

W dalszej części eksperymentów wykonano szczegółowe badania efektywności bielącej poszczególnych związków chemicznych, w celu określenia ich wpływu na skuteczność procesu rafinacji parafiny. Analiza obejmowała ocenę zdolności adsorpcyjnych każdego z komponentów, ze szczególnym uwzględnieniem ich właściwości odbarwiających. Testy przeprowadzono w kontrolowanych warunkach laboratoryjnych.

Na podstawie uzyskanych wyników porównano efektywność bielącą poszczególnych tlenków i określono ich optymalne proporcje w syntetycznej ziemi krzemkowej. Szczególną uwagę zwrócono na rolę SiO_2 jako głównego nośnika adsorpcyjnego, a także potencjalny wpływ MgO , Al_2O_3 , Fe_2O_3 i CaO na selektywność procesu oczyszczania. Wyniki tych badań dostarczyły istotnych informacji na temat mechanizmów usuwania barwników przemysłowych z parafiny oraz pozwoliły na wskazanie najbardziej efektywnej kompozycji adsorbentu.

7. REALIZACJA BADAŃ WŁASNYCH

7.1. BADANIE SKUTECZNOŚCI ZIEMI „PALMAX” – ADSORBENT SYNTETYCZNY VS. KOMERCYJNY

W celu porównania skuteczności rafinacji parafiny przy użyciu komercyjnej ziemi krzemkowej „Palmax” oraz jej laboratoryjnie odtworzonego odpowiednika przeprowadzono eksperyment składający się z kilku kluczowych etapów. Procedura badawcza obejmowała przygotowanie próbek, ich homogenizację oraz ekspozycję na zadaną temperaturę i czas w kontrolowanych warunkach laboratoryjnych.

Etapy eksperymentów badawczych

Przygotowanie syntetycznej mieszanki adsorpcyjnej

Na podstawie składu chemicznego komercyjnej ziemi krzemkowej „Palmax” opracowano jej laboratoryjny odpowiednik, przygotowując sypką mieszkankę z dokładnie odważoną ilością następujących związków chemicznych: SiO_2 , MgO , Al_2O_3 , Fe_2O_3 oraz CaO . Tak przygotowaną próbkę dokładnie wymieszano w celu zapewnienia jednorodnego składu.

Przygotowanie próbki parafiny

Za pomocą precyzyjnej wagi laboratoryjnej odważono odpowiednią ilość parafiny, do której następnie dodano barwnik przemysłowy w kolorze czerwonym w stężeniu 0,1%. Całość umieszczono na laboratoryjnym mieszadle magnetycznym z płytą grzewczą, zapewniającą utrzymanie jednorodnej temperatury oraz efektywne mieszanie roztworu.

Podział roztworu na próbki testowe

Po dokładnym wymieszaniu i rozpuszczeniu barwnika 100 g przygotowanego roztworu parafinowego przelano do oddzielnych, uprzednio oznakowanych zlewek laboratoryjnych.

Dodanie adsorbentu

Do pierwszej zlewki dodano 1 g (tj. 1% masy roztworu) syntetycznie odtworzonej mieszanki adsorpcyjnej, naśladującej skład ziemi krzemkowej „Palmax”. Do drugiej zlewki dodano 1 g komercyjnej ziemi krzemkowej „Palmax” otrzymanej od producenta.

Obróbka termiczna i mieszanie

Obie próbki umieszczono w kontrolowanych warunkach temperaturowych, ustawiając mieszadło magnetyczne na temperaturę 100°C oraz prędkość mieszania na 500 obrotów na minutę (RPM). Proces trwał 45 minut, co miało na celu zapewnienie optymalnej interakcji adsorbentu z parafiną oraz umożliwienie zupełnej rafinacji i odbarwienia roztworu. Na rysunkach 3 i 4 przedstawiono wybrane elementy realizowanego procesu.



Rys. 3. Roztwór czerwonego barwnika z ziemią „Palmax” uzyskaną od producenta



Rys. 4. Roztwór czerwonego barwnika z ziemią „Palmax” wykonaną laboratoryjnie

7.2. BADANIE SKUTECZNOŚCI POSZCZEGÓLNYCH ZWIĄZKÓW CHEMICZNYCH

W celu określenia wpływu poszczególnych składników ziemi krzemkowej na proces rafinacji parafiny przeprowadzono badania skuteczności każdego związku chemicznego z osobna. Eksperyment został przeprowadzony analogicznie do procedury opisanej w poprzedniej

sekcji. Powtórzono wszystkie kroki, jednak zamiast kompleksowej mieszanki adsorpcyjnej testowano pojedyncze składniki o masie równej 1% masy roztworu, w celu określenia ich indywidualnego wpływu na proces oczyszczania parafiny.

Etapy eksperymentów badawczych

Przygotowanie roztworu parafinowego

Podobnie jak w poprzednim eksperymencie odważono 100 g parafiny i dodano do niej 0,1% barwnika przemysłowego w kolorze czerwonym. Roztwór umieszczono na laboratoryjnym mieszadłe magnetycznym z płytą grzewczą, zapewniając ciągłe mieszanie i utrzymanie jednorodnej temperatury.

Podział próbek i dodanie związków chemicznych

Przygotowany roztwór parafinowy rozdzielono na pięć osobnych próbek po 100 g każda, a następnie do każdej z nich dodano dokładnie 1 g (1% masy parafiny) jednego z badanych związków chemicznych:

- ditlenek krzemu (SiO_2) – główny składnik ziem okrzemkowych, znany z wysokiej porowatości i zdolności adsorpcyjnych,
- tlenek magnezu (MgO) – wykorzystywany ze względu na swoje właściwości neutralizujące i stabilizujące procesy chemiczne,
- tlenek glinu (Al_2O_3) – związek o dużej powierzchni właściwej, który może wpływać na skuteczność adsorpcji zanieczyszczeń,
- tlenek żelaza (Fe_2O_3) – potencjalnie modyfikujący powierzchniowe właściwości adsorbentu, mogący wpływać na selektywność procesu oczyszczania,
- tlenek wapnia (CaO) – stosowany jako regulator zasadowości układu, mogący wspomagać proces neutralizacji niepożądanych substancji organicznych.

Obróbka termiczna i mieszanie

Wszystkie próbki poddano identycznemu procesowi co w poprzednim eksperymencie, tj. umieszczono je na mieszadłe magnetycznym i poddano działaniu temperatury 100°C przy prędkości mieszania 500 RPM przez 45 minut.

8. WYNIKI BADAŃ

Uzyskane próbki po zakończeniu procesu rafinacji wylano na metalowe pokrywki puszek i pozostawiono do całkowitego zastygnięcia. Następnie przeprowadzono ich ocenę organoleptyczną, koncentrując się na aspekcie wizualnym oraz porównaniu efektywności usuwania barwnika. Wyniki przedstawiono na rysunku 5.

Analiza wyników wykazała istotne różnice w skuteczności oczyszczania parafiny między syntetycznie przygotowanym adsorbentem a jego komercyjnym odpowiednikiem. Potwierdziła też, że laboratoryjnie za pomocą uzyskanego na bazie ziemi okrzemkowej „Palmax” adsorbentu nie uzyskano praktycznie żadnego efektu związanego z odbarwieniem parafiny, co sugeruje jego niską aktywność adsorpcyjną. Natomiast w przypadku oryginalnego produktu dostarczonego przez producenta osiągnięto efektywność znacznie wyższą. Wyniki te

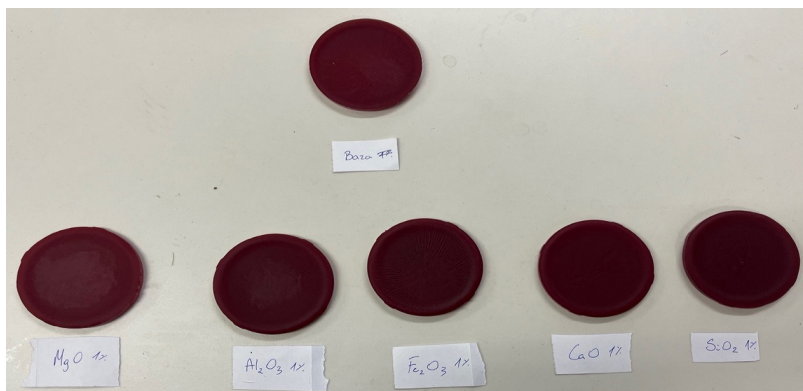
wskazują, że syntetyczny odpowiednik nie jest w stanie zastąpić komercyjnego produktu w obecnej postaci. Podjęto próbę zwiększenia skuteczności laboratoryjnie otrzymanego adsorbentu dzięki podwojeniu jego stężenia w roztworze do 2%. Zmiana ta przyniosła jedynie minimalną poprawę, jednak nadal rezultat nie był zadowalający. Wyniki jednoznacznie wskazują, że opracowany w warunkach laboratoryjnych adsorbent nie jest w stanie skutecznie zastąpić oryginalnego produktu i konieczne są dalsze badania nad modyfikacją jego składu.



Rys. 5. Wyniki badania skuteczności ziemi „Palmax” komercyjnej i syntetycznej

Od lewej do prawej: syntetyczna mieszanka ziemi „Palmax” otrzymana laboratoryjnie, podwójna dawka ziemi „Palmax” otrzymana syntetycznie, przemysłowa ziemia „Palmax” od producenta

W ramach kolejnego etapu badań analizowano wpływ pojedynczych związków chemicznych (SiO_2 , MgO , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , CaO) na proces rafinacji. Wyniki jednoznacznie pokazały, że żaden z testowanych związków nie spełnił oczekiwań pod względem skuteczności odbarwiania parafiny. Brak zauważalnych różnic w wynikach między próbkami z poszczególnymi substancjami a próbką kontrolną pozwala wyciągnąć wniosek, że żaden z tych związków nie ma istotnych właściwości adsorpcyjnych w tym konkretnym procesie. Otrzymane wyniki przedstawiono na rysunku 6.



Rys. 6. Wyniki badania skuteczności poszczególnych związków chemicznych

Przypuszczano, że przynajmniej część analizowanych substancji przyczyni się do poprawy efektywności rafinacji, jednak uzyskane dane empiryczne temu zaprzeczają. Wyniki te wskazują, że badana metoda oczyszczania parafiny wymaga dalszej optymalizacji – zarówno pod względem zastosowanych adsorbentów, jak i ewentualnych modyfikacji procesowych.

9. WNIOSKI

Przeprowadzone eksperymenty wykazały, że początkowe założenie dotyczące skuteczności oczyszczania parafiny przy wykorzystaniu pojedynczych tlenków metali, takich jak SiO_2 , MgO , Al_2O_3 , Fe_2O_3 oraz CaO , okazało się nieprawdziwe. Zakładano, że naturalna porowatość tych substancji pozwoli na efektywne usuwanie zanieczyszczeń, jednak testy jednoznacznie wykazały, że same tlenki, nawet w odpowiednich proporcjach, nie mają wystarczających właściwości adsorpcyjnych.

Kluczowym czynnikiem wpływającym na skuteczność rafinacji parafiny okazała się aktywacja chemiczna ziem adsorpcyjnych, przeprowadzona za pomocą kwasów, takich jak HCl oraz H_2SO_4 . Proces ten istotnie zwiększa zdolności adsorpcyjne materiałów, umożliwiając efektywne usuwanie barwników i zanieczyszczeń. W przeciwieństwie do pojedynczych tlenków metali odpowiednio przygotowane ziemie rafinujące są bardzo skuteczne w oczyszczaniu parafiny, co potwierdza konieczność ich modyfikacji przed zastosowaniem w praktyce przemysłowej.

Otrzymane wyniki sugerują, że dalsze badania powinny koncentrować się na optymalizacji procesu aktywacji ziem rafinujących z wykorzystaniem różnych reagentów chemicznych oraz parametrów procesu. W szczególności istotnym kierunkiem przyszłych badań może być zastosowanie alternatywnych metod aktywacji, takich jak modyfikacja za pomocą pary wodnej, co może prowadzić do zwiększenia porowatości i dalszej poprawy właściwości adsorpcyjnych. Ponadto warto rozważyć badania nad innymi substancjami charakteryzującymi się wysoką porowatością – takimi jak zeolity oraz węgiel aktywny, które mają dobrze udokumentowane zdolności adsorpcyjne i mogą stanowić alternatywę dla klasycznych ziem rafinujących lub ich uzupełnienie.

Podsumowując, można stwierdzić, że przeprowadzone eksperymenty wskazują na konieczność dalszej optymalizacji metod rafinacji parafiny dzięki doskonaleniu procesów aktywacji adsorbentów. Wykorzystanie chemicznie modyfikowanych ziem rafinujących oraz eksploracja nowych, wysokoporowatych materiałów może przyczynić się do opracowania efektywniejszych i bardziej ekonomicznych technologii oczyszczania parafiny, które znajdą szerokie zastosowanie w przemyśle chemicznym i petrochemicznym.

Podziękowania

Publikacja powstała na podstawie referatu 65. Konferencji Barbórkowej, który zajął I miejsce w XVI sekcji. Serdeczne wyrazy wdzięczności za wsparcie merytoryczne kieruję w stronę Pana dr. inż. Mariusza Niekurzaka, opiekuna koła naukowego „Menadżer Produkcji”.

LITERATURA

- [1] Antosz A., Ptak S., *Badania możliwości powtórnego wykorzystania surowców odpadów powstających w trakcie produkcji świec*, Nafta-Gaz, vol. 78, nr 10, 2022, s. 760–775, <https://doi.org/10.18668/NG.2022.10.07>.
- [2] Szymańska J.A., Frydrych B., *Parafina stała – dymy. Dokumentacja dopuszczalnych wielkości narażenia zawodowego*, Podstawy i Metody Oceny Środowiska Pracy, nr 3(49), 2006, s. 133–143.

Agata Zapalowska*

LUSTERCZKO, LUSTERCZKO,
POWIEDZ PRZECIE, CZYM JEST OBCOŚĆ W ŚWIECIE –
LUB PRZYNAJMNIEJ KIM JEST OBCY WE MNIE?
INTERPRETACJA *ARCANE* I *DROGI*
PRZEZ PRYZMAT PSYCHOANALIZY
ORAZ STUDIÓW NAD OBCOŚCIĄ INTRAPERSONALNĄ

Przedmiotem artykułu jest psychoanalityczne spojrzenie (w ujęciu Jacques’a Lacana oraz Julii Kristevej) na zagadnienie obcości w samym sobie oraz połączenie go z motywem odbicia lustrzanego w dziełach kultury. Psychoanalityczny korpus pojęciowy pozwala na rozważenie świata wewnętrznych przeżyć bohaterów oraz wytyczenie w ich podmiotowości obszarów uznawanych za obce. Zwierciadło z kolei rozpatrywane jest jako możliwy kanał komunikacji treści dotyczących analizowanego motywu obcości oraz narzędzie pozwalające na lepsze zrozumienie głębi psychologicznej bohaterów. W obrębie artykułu przeprowadzone zostały dwie interpretacje skupione wokół wyżej zarysowanych obszarów – analiza serialu *Arcane* studia Fortiche Production oraz powieści *Droga* Cormaca McCarthy’ego.

MIRROR, MIRROR ON THE WALL, WHAT IS OTHERNESS IN THE WORLD –
OR AT LEAST WHO IS THE OTHER WITHIN MYSELF?
INTERPRETATION OF *ARCANE* AND *THE ROAD* THROUGH THE LENS OF
PSYCHOANALYSIS AND STUDIES ON INTRAPERSONAL OTHERNESS

The subject of the article is a psychoanalytic perspective (based on the theories of Jacques Lacan and Julia Kristeva) on the issue of otherness within oneself and its connection to the motif of the mirror reflection in works of culture. The psychoanalytic conceptual framework allows for an exploration of the internal experiences of characters and the delineation of areas within their subjectivity that are perceived as foreign. The mirror is considered a potential channel for communicating ideas related to the examined motif of otherness, as well as a tool for gaining a deeper understanding of the psychological complexity of the characters. Within the study, two interpretations have been conducted, focusing on the aforementioned aspects (an analysis of the *Arcane* series by Fortiche Production and Cormac McCarthy’s novel *The Road*).

* AGH Akademia Górniczo-Hutnicza, Wydział Humanistyczny, Kulturoznawcze Koło Naukowe.

1. WSTĘP

Wkomponowanie lustra jako rekwizytu w dziełach kultury niejednokrotnie prowokuje do rozważań nad metaforycznymi i symbolicznymi znaczeniami odbicia. Niniejszy artykuł stanowi próbę interpretacji motywu zwierciadła przez pryzmat studiów nad obcością, a zatem spojrzenia na ten przedmiot jako odnoszący się do przeciwstawnych kategorii swojskości i obcości, granic obszarów znanego i nieznanego oraz momentów, gdy strony te konfrontują się ze sobą. Sednem analiz jest szczególnie motyw obcości – obcość intrapersonalna, a więc mająca źródło w wewnętrznych przeżyciach bohaterów.

Punktem wyjścia dla rozważenia tej tematyki są słowa zawarte przez Arthura Rimbauda w jednym z jego listów – „JA jest innym”¹ [1, s. 51]. Pojawiająca się tutaj niezgodność gramatyczna sugeruje, że wewnątrz podmiotu istnieje jakaś inna, obca część, która nie pozwala na myślenie o nas samych jako o jednostkach w pełni autonomicznych. Ze względu na tak określony zakres badawczy w przeprowadzonych interpretacjach podstawę teoretyczną stanowić będzie aparat psychoanalityczny w ujęciu Jacques’a Lacana oraz Julii Kristevej. Dostarcza on bowiem szerokiej terminologii opisującej świat wewnętrznych przeżyć oraz pozwala na zarysowanie w jego obrębie terenów odbieranych przez podmiot jako swojskie/własne oraz tych wydających się obcymi. Zostanie on następnie wykorzystany w interpretacji prze-myśleń, uczuć, postaw oraz zachowań wybranych bohaterów serialu *Arcane* (2021–2024) wyprodukowanego przez studio Fortiche Production oraz powieści *Droga* (2006) Cormaca McCarthy’ego. Obie analizy psychoanalityczne osadzone będą w kontekście sytuacji, w której postaci stykają się z własnym odbiciem w lustrze, a zwierciadło przedstawione zostanie jako kanał komunikacji przekazujący informacje dotyczące motywu skrytej we wnętrzu obcości.

2. WPROWADZENIE TEORETYCZNE

2.1. PSYCHOANALIZA W UJĘCIU JACQUES’A LACANA

Wprowadzenie teoretyczne chciałabym rozpocząć od przywołania niektórych założeń teorii Lacana i przedstawienia pojęć niezbędnych do analizy. Pierwszym z nich jest Wielki Inny (*l’Autre*) na stałe włączony w struktury podmiotowości. Dylan Evans, jeden z interpretatorów myśli psychoanalityka, pisze, że „Wielki Inny reprezentuje radykalną obcość przekraczającą iluzoryczną inność wyobrażeniowego, ponieważ nie może być zasymilowany przez identyfikację. Lacan utożsamia tę radykalną obcość z językiem oraz prawem [...]”² [2, s. 136]. Obszarem działania jest tutaj jedynie sfera symbolicznego³, toteż nie

¹ Dosłowne tłumaczenie słów *JE est un autre*. Wszystkie tłumaczenia dzieł obcojęzycznych to – jeżeli nie podano inaczej – przekład autorki artykułu.

² Cytat oryginalny: „The big Other designates radical alterity, an other-ness which transcends the illusory otherness of the imaginary because it cannot be assimilated through identification. Lacan equates this radical alterity with language and the law [...]”.

³ Lacan w swojej koncepcji wyróżnił trzy porządki – wyobrażeniowe, symboliczne oraz realne. Na potrzeby prowadzonych analiz warto przybliżyć dwa pierwsze, w czym ponownie powolałam się na słowa Evansa. Opisując wyobrażeniowe, skupia się on na podstawowej cesze, czyli funkcjonowaniu w obszarze obrazów, oraz zaznacza iluzoryczność i zwodniczość tego porządku: „Wyobrażeniowe jest królestwem obrazu i wyobraźni, oszustwa i wabienia. Głównymi iluzjami wyobrażeniowego są iluzje całości, syntezy, autonomii, dualności i, przede

można odszukać konkretnego wizerunku Innego w rzeczywistości, a jego funkcjonowanie opiera się na przyjętych i zinternalizowanych w nieświadomości normach.

Wielki Inny nie jest jednak jedynym rodzajem obcości wyróżnionym przez Lacana, bowiem w obrębie jego teorii pojawia się również mały inny (*l'autre*). Zdefiniowany jest on jako „[...] inny, który wcale nie jest innym, gdyż jest istotnie powiązany z ego w relacji zawsze refleksyjnej i wymiennej – ego jest zawsze *alter ego*”⁴ [3, s. 321]. Mały inny przejawia się w dwóch odmiennych formach – „[...] jest jednocześnie odpowiednikiem (*counterpart*) i obrazem lustrzanym (*specular image*)”⁵ [2, s. 135]. Relacjami, w które ego wchodzi z małym innym, są zatem projekcja (w przypadku odpowiednika⁶) oraz odbicie (w przypadku obrazu lustrzanego). Sytuują one ten rodzaj obcości w pełni w domenę wyobraźniowego, wiążąc go ze zjawiskiem określanym jako faza lustra (*stade du miroir*). Punktem wyjścia do rozważania tej koncepcji na potrzeby analizy nie jest jednak początkowy jej kształt odnoszący się do pewnego etapu w życiu dziecka, a późniejsza wersja, bowiem „[o]d wczesnych lat 50. Lacan nie postrzegał jej [fazy lustra – A.Z.] po prostu jako momentu w życiu niemowlęcia, ale widział w niej permanentną strukturę podmiotowości [...]”⁷ [2, s. 118]. Jest to więc zjawisko, które nie przyjmuje postaci pojedynczego wydarzenia, a raczej czegoś, z czym podmiot styka się każdorazowo w chwili konfrontacji z własnym wizerunkiem i co umożliwia mu, jak pisze Lacan, nakreślenie stosunków między światem wewnętrznym a środowiskiem otaczającym: „Funkcją fazy lustra okazuje się, moim zdaniem, szczególny przypadek funkcji obrazów (*imagos*), czyli ustalenie relacji między organizmem a jego rzeczywistością lub, jak to mówią, między *Innenwelt* a *Umwelt*”⁸ [4, s. 97]. Faza lustra związana jest ze zjawiskiem nieporozumienia (*méconnaissance*) wywołanego przez fakt, że odbicie lustrzane (tudzież odpowiednik) należy w pełni do porządku wyobraźniowego, więc obraz samego siebie, choć z pozoru znajomy, jest obcy względem nas samych – „[...] w porządku wyobraźniowym samo-znajomość (*me-connaissance*) jest synonimiczna z nieporozumieniem

wszystkim, podobieństwa. Wyobraźniowe jest zatem porządkiem powierzchownych i zwodniczych pozorów, obserwowalnych zjawisk, które ukrywają leżącą u ich podstaw strukturę [...]” [2, s. 84]; cytat oryginalny: „The imaginary is the realm of image and imagination, deception and lure. The principal illusions of the imaginary are those of wholeness, synthesis, autonomy, duality and, above all, similarity. The imaginary is thus the order of surface appearances which are deceptive, observable phenomena which hide underlying structure [...]”. Symboliczne jest z kolei przedstawione jako przeciwstawność wyobraźniowego, u której podstaw odnaleźć można kulturę: „Symboliczne jest królestwem Prawa [...]. Jest to świat kultury w przeciwieństwie do wyobraźniowego porządku natury. [...] Porządek symboliczny jest w pełni autonomiczny: nie jest superstrukturą zdeterminowaną przez biologię czy genetykę. Jest on całkowicie zależny od rzeczywistości [...]” [2, s. 204]; cytat oryginalny: „The symbolic is the realm of the Law [...]. It is the realm of culture as opposed to the imaginary order of nature. [...] The symbolic order is completely autonomous: it is not a superstructure determined by biology or genetics. It is completely contingent with respect to the real [...]”.

⁴ Cytat oryginalny: „[...] the other which isn't another at all, since it is essentially coupled with the ego, in a relation which is always reflexive, interchangeable – the ego is always an alter-ego”.

⁵ Cytat oryginalny: „[...] is simultaneously the counterpart and the specular image”.

⁶ Odpowiednik, jak pisze Evans, „[...] oznacza innych ludzi, do których podmiot jest podobny (przede wszystkim chodzi o podobieństwo wizualne)” [2; 29]; cytat oryginalny: „[...] designates other people in whom the subject perceives a likeness to himself (principally a visual likeness)”.

⁷ Cytat oryginalny: „[b]y the early 1950s Lacan no longer regards it simply as a moment in the life of the infant, but sees it as also representing a permanent structure of subjectivity [...]”.

⁸ Cytat oryginalny: „The function of the mirror stage thus turns out, in my view, to be a particular case of the function of *imagos*, which is to establish a relationship between an organism and its reality – or, as they say, between the *Innenwelt* and the *Umwelt*”.

(*méconnaissance*), ponieważ w procesie, w którym ego jest formowane podczas fazy lustra, dochodzi równocześnie do wyobcowania z określającego byt porządku symbolicznego⁹ [2, s. 112]. Wobec powyższego każde spojrzenie podmiotu w lustro wiąże się nierozdzielnie ze spojrzeniem na małego innego oraz doświadczeniem alienacji.

Ostatnim pojęciem, do którego chciałabym odwołać się w obrębie teorii Lacana, jest obiekt małe *a* (*objet petit a*). Wedle definicji „[o]biekt małe *a* to każdy obiekt, który wprawia pożądanie w ruch [...]”¹⁰ [2, s. 128]. Jest nim zatem wszystko to, co podmiot przyjmuje za własne pragnienia i ku czemu stara się dążyć, ale jednocześnie cel, do którego nigdy nie jest w stanie dotrzeć – „[...] im bardziej człowiek zbliża się do tego, co – jak wierzy – jest obiektem jego pożądania, otacza się tym i pieści, to tym bardziej jest od tego w rzeczywistości odciągany i rozpraszany”¹¹ [5, s. 41]. Konieczne jest zwrócenie uwagi na więzi łączące obiekt małe *a* z wcześniej wprowadzonymi terminami. Lacan zaznacza, iż „[m]ałe *a* [...] nie jest widoczne w obrazie, który wywołuje u człowieka pożądanie”¹² [5, s. 41]. Oznacza to, że nie jest ono dostrzegalne ani w odbiciu lustrzanym, ani w odpowiedniku, co prowadzi do doświadczenia obcości wobec małego innego. Spowodowane jest to faktem, iż „[...] każde pragnienie jest zawsze pragnieniem Innego. Znaczy to tyle, że zawsze pytamy Innego, czego pragnie”¹³ [6, s. 38]. Obiekty pożądania są wobec tego definiowane za pomocą porządku symbolicznego, wewnątrz którego funkcjonuje Wielki Inny, dyktując to, do czego podmiot dąży, oraz tworząc iluzoryczne poczucie chęci lub potrzeby na kolejnych etapach w osiągnięciu zamierzonych celów.

2.2. PSYCHOANALIZA W UJĘCIU JULII KRISTEVEJ

Drugim z teoretycznych filarów dalszych interpretacji jest teoria abiekcji zbudowana przez Kristewą. Definiuje ona abiekt (*l'abject*) następująco: „[...] wstrętne jest to, co zaburza tożsamość, system, ład. Co nie przestrzega granic, miejsc, zasad. Pewne pomiędzy, dwuznaczne, mieszane”¹⁴ [7, s. 10]. Zetknięcie z abiektem wiąże się z intensywnymi reakcjami wywołanymi zagrożeniem dla własnej podmiotowości – „[...] abiekt odnosi się do ludzkiej reakcji (przerażenia, wymiotów) na zagrożenie załamania znaczenia, spowodowanego przez utratę rozróżnienia między podmiotem a obiektem lub między sobą a innym”¹⁵ [8]. W obrębie tej teorii chciałabym nawiązać do tego, jak abiekt łączy się z kształtowaniem tożsamości oraz jak postrzegać go można jako wewnętrzną obcość.

⁹ Cytat oryginalny: „[...] in the imaginary order, selfknowledge (*me-connaissance*) is synonymous with misunderstanding (*méconnaissance*), because the process by which the ego is formed in the mirror stage is at the same time the institution of alienation from the symbolic determination of being”.

¹⁰ Cytat oryginalny: „[o]bj_{et} petit *a* is any object which sets desire in motion [...]”.

¹¹ Cytat oryginalny: „[...] the more man approaches, encircles and caresses what he believes to be the object of his desire, the more he is in fact diverted and distracted from it”.

¹² Cytat oryginalny: „[t]he *a* [...] isn't visible in what constitutes for man the image of his desire”.

¹³ Cytat oryginalny: „[...] desire full stop is always the desire of the Other. Which basically means that we are always asking the Other what he desires”.

¹⁴ W polskim tłumaczeniu eseju Kristevej słowo *l'abject* przełożone zostało jako wstręt. Aby jawnie podkreślić odwołania do koncepcji filozofki, korzystam w częściach poza przytaczanymi cytatami z formy abiekt i jej pochodnych.

¹⁵ Cytat oryginalny: „[...] the abject refers to the human reaction (horror, vomit) to a threatened breakdown in meaning caused by the loss of the distinction between subject and object or between self and other”.

Według Kristevej abiekcja jest to proces zdefiniowania samego siebie, przebiegający w niezwykle gwałtowny sposób – „[...] odrzucam **siebie**, wypływam **siebie**, czuję wstręt do **siebie** – i to w tym samym ruchu, w którym »ja« utrzymuję, że siebie ustanawiam. [...] »ja« jestem w trakcie stawania się kimś innym za cenę własnej śmierci. Na tej drodze, gdzie »ja« staję się, rodzę siebie wśród gwałtownych spazmów, wymiotów” [7, s. 9]. Zetknięcie z abiektem każdorazowo jest sytuacją, w której podmiot znajduje się między znanymi porządkami i musi nakreślić granicę, a siebie określić jako należącego do jednej ze stron. Podziały są jednak niejednoznaczne, a linie odgradzające obszary są zatarte i ciągle podlegają redefinicji (*le jeté*)¹⁶:

Bo przestrzeń, która interesuje wyrzuconego, wykluczonego, nigdy nie jest **jedna** ani **jednorodna**, ani nie daje się **ogarnąć całościowo**. Przestrzeń ta jest w istocie swej podzielna, elastyczna, katastroficzna. Twórca obszarów, języków, dzieł, **wyrzucony** nie przestaje wyznaczać zasięgu swojego świata, którego płynne granice – płynne, ponieważ tworzone przez nieprzedmiot, przez wy-miot – cały czas kwestionują jego stabilność i zmuszają do rozpoczynania na nowo [7, s. 13–14].

Pozostaje jeszcze zastanowić się, w jaki sposób abiekt ujmowany może być jako obcość wewnątrz podmiotu. Uwagę warto zwrócić na to, że zbudowany jest on wokół tego, co nierozpoznawalne – „[...] wstręt buduje się przez nierozpoznawanie swych bliskich; nic mu nie jest znane, nawet cień wspomnienia” [7, s. 11]. Abiekt jest więc czymś dla nas nieznanym, czasem niezrozumiałym, a stąd – obcym. W takiej sytuacji „[...] podmiot odkrywa siebie jako konstrukcję zbudowaną na zetknięciu z obcością”¹⁷ [9, s. 280]. Sam kontakt z czymś odmiennym nie jest jednorazowy (jak już zaznaczyłam wyżej, granice wciąż ulegają redefinicji) i co więcej, wiąże się z zakorzenieniem abiektu w pamięci, dzięki czemu możliwe jest kształtowanie spójnej tożsamości. Abiekt wobec tego staje się pewnym „[...] gdzie indziej, odpychającym i odepchniętym ciężarem, niedostępnym i intymnym obszarem pamięci [...]” [7, s. 12]. W tej postaci jawi się on jako obca częśćka w nas samych.

3. ANALIZA *ARCANE* Z WYKORZYSTANIEM TEORII LACANA

Część analityczną rozpocznę od interpretacji serialu *Arcane*¹⁸, w której posłużę się pojęciami zaczerpniętymi z psychoanalizy Lacanowskiej. Zanim jednak do nich przejdę, warto jest przyjrzeć się konkretnej sytuacji ze zwierciadłem. W jednym z odcinków *Jinx* przedstawiona jest w rozbitym lustrze¹⁹, a pęknięcie ukazane jest w charakterystycznym punkcie – na

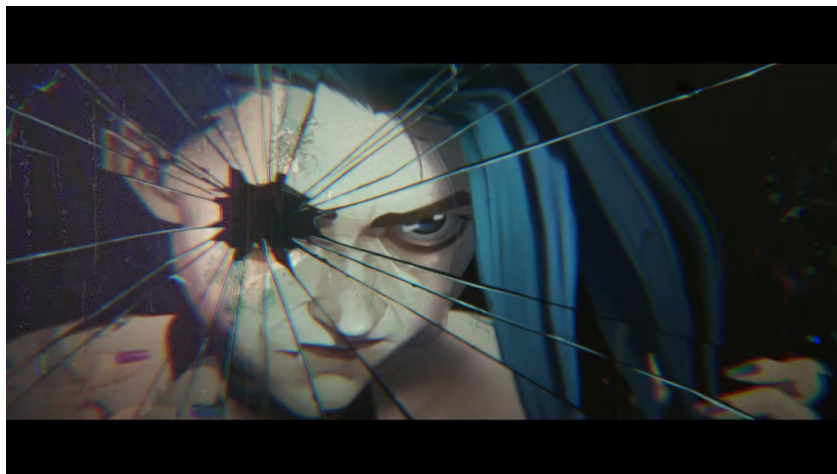
¹⁶ Wyrzuconym lub wykluczonym Kristeva określa to, od czego podmiot odgranicza się w procesie kształtowania własnej tożsamości.

¹⁷ Cytat oryginalny: „[...] the subject discovers itself as founded on an encounter with alterity”.

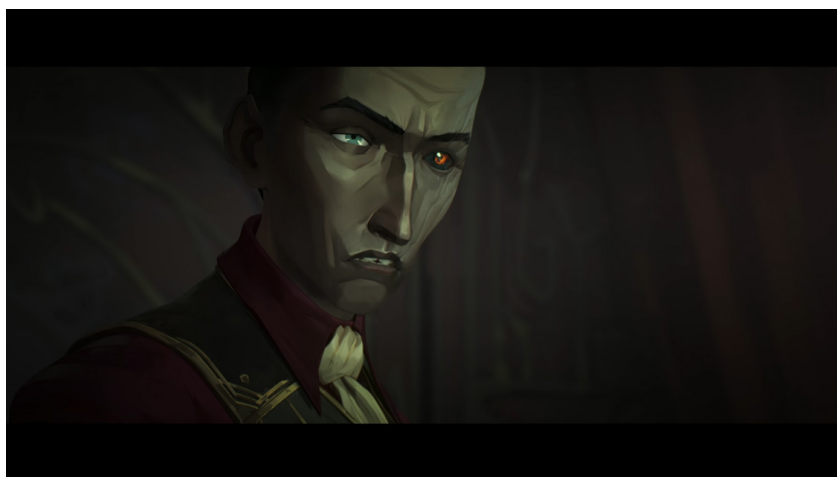
¹⁸ Jednym z głównych motywów pierwszego sezonu serialu jest konflikt wewnątrz dwumiasta Piltover i Zaun. Podmiejska dzielnica Zaun od wielu lat stara się odłączyć od górnego miasta, jednakże trwająca nieustannie rebelia nie przybiera jednolitej formy – buntownicy nie są zjednoczeni, a wokół różnych przywódców gromadzą się ich własne grupy. Jednym z liderów jest Vander opiekujący się kilkoma sierotami, wśród których znajdują się pierwszoplanowe bohaterki – Vi oraz jej siostra Powder – później przyjmująca imię Jinx). W wyniku burzliwych wydarzeń Powder zostaje odrzucona przez drugą protagonistkę i trafia pod opiekę innego z przywódców – Silco, który od tej chwili zaczyna pełnić dla niej rolę ojca.

¹⁹ W odcinku *Chłopczyk Zbawca* pojawia się scena, w której Jinx powraca do własnej siedziby, by opatrzyć rany po stoczonej niedawno walce. Podczas sekwencji doświadcza omamów słuchowych dotyczących powtórnego spotkania z siostrą. Bohaterka wdaje się w rozmowę z dręczącym ją głosem (sugerującym, że minione wydarzenie

jednym z oczu bohaterki (rys. 1). Scena ta od razu przywołuje na myśl postać Silco, którego oko zostało trwale uszkodzone przed laty (rys. 2). Widoczne między przedstawionymi postaciami podobieństwo nakierowuje na możliwe interpretacje psychoanalityczne.



Rys. 1. Kadr przedstawiający spoglądającą w lustro Jinx oraz pęknięcie znajdujące się w miejscu jednego z jej oczu [10, S01E07, 00:10:06]



Rys. 2. Silco z widocznym trwale uszkodzonym lewym okiem [10, S01E07, 00:09:33]

było częścią podstępu) i wyraża nadzieję, że zachowanie Vi było szczere i motywowane potrzebą odszukania siostry oraz zacieśnienia z nią więzi. Jinx ujawnia niedającą się wyprzeć potrzebę siostrzanej miłości, ale jednocześnie jest zagubiona, bowiem nie potrafi odczytać motywacji drugiej strony. W trakcie sceny spogląda ona kilkakrotnie w rozbite lustro, a pęknięcie znajduje się na jednym z jej oczu [10, S01E07, 00:09:47–00:10:57].

Tak jak zaznaczyłam wcześniej, Wielki Inny sytuuje się w sferze porządku symbolicznego, toteż nie należy upatrywać go w obszarze wyobraźniowym. Niemniej jednak zauważalne podobieństwo wizualne może w metaforyczny sposób przedstawiać wpływ poszczególnych bohaterów na kształt figury Innego, choć trzeba podkreślić, że nie można utożsamiać jej z jedną, konkretną postacią. Silco od pewnego momentu zaczyna pełnić dla Jinx rolę ojca. Jest to chwila transformacji bohaterki, gdyż zyskuje ona nowe imię i od tej pory stara się wyprzeć poprzednią tożsamość (dziecięcą Powder). Jednocześnie staje się on dla niej autorytetem, a jego oczekiwania wytyczają obieraną przez nią ścieżkę. Wcześniej podobne funkcje pełnili w jej życiu poprzedni ojczym Vander oraz przede wszystkim starsza siostra Vi. Symboliczne ujęcie podobieństwa może wskazywać w tym miejscu na częściową rekonfigurację Wielkiego Innego oraz jego zależność od otaczającego go środowiska – tak jak dziecięcymi ideałami dla Powder byli Vi oraz Vander, tak później dla Jinx stał się nim Silco (choć sytuacja ta jest właściwie dość dynamiczna, jako że do bohaterki nieustannie powracają wspomnienia z odległej przeszłości). Oczywiście na figurę Innego nadal składają się między innymi niezależny od bohaterów język czy pewne uwarunkowania kulturowe, aczkolwiek niektóre normy, zachowania i dążenia ściśle wynikają z dynamiki relacji oraz z zachodzących w niej zmian.

W tym miejscu poruszyć należy także kwestię pragnień oraz ich formowania przez wewnętrzną radykalną obcość. Podobnie jak Wielki Inny nie są one widoczne w lustrzanym obrazie, ale dostrzegalna zbieżność wizualna może i w tym przypadku zasugerować możliwą interpretację. Od dzieciństwa jednym z największych pragnień Jinx było poczucie pełnej akceptacji oraz docenienia. Silco, okazując jej w kryzysowym momencie troskę, zaczyna jawić się jako ten, który może jej to zapewnić. Bohaterka staje się z czasem prawą ręką ojczyma, a wypełniając jego polecenia i uznając jego dążenia za własne, a także modelując zachowania tak, by zyskać jego aprobatę, liczy na otrzymanie tego, czego zawsze pragnęła. Chociaż obiektu małe *a* nie sposób dostrzec w porządku wyobraźniowym, to przedstawione podobieństwo może zaznaczać go metaforycznie i ukazywać trajektorię rozwoju Jinx – aby osiągnąć spełnienie, musi ona w kształtowaniu własnej tożsamości zbliżyć się do ojczyma. Finalnie wydaje się, że dotarła do celu, bowiem w ostatnich wypowiedzianych przez Silco słowach pojawia się zupełna akceptacja oraz miłość – „Nigdy bym cię im nie oddał. Za nic w świecie. [...] Jesteś doskonała” [10, S01E09, 00:32:52–00:33:04]. Przypieczętują one tożsamość bohaterki jako ukształtowanej przez drugiego ojczyma Jinx, bowiem w wymowny sposób odrzuca ona wówczas Powder²⁰, choć mimo to w kolejnych ujęciach wyraża niespełnioną nadzieję bycia pokochaną przez starszą siostrę tak samo jak w dzieciństwie. Znakomicie obrazuje to zarówno iluzoryczność obiektów pożądania, jak i ich nieuchwytność. Każde zbliżenie się do tego, czego się pragnie, budzi rozczarowanie oraz niedosyt, a także wskazuje kolejne (równie obce) cele na horyzoncie.

Zbieżność wizerunków można rozpatrywać także w kategoriach małego innego oraz relacji odbicia i projekcji. W opisywanej scenie bohaterka patrzy na własną twarz w zwierciadle, ale jednocześnie dzięki pojawieniu się pęknięcia w charakterystycznym punkcie odszukać można tutaj także podobiznę odpowiednika – Silco. Moment spojrzenia w lustro jest chwilą, gdy samo-znajomość tożsama jest z nieporozumieniem. Odbicie oczywiście obrazuje postać

²⁰ Bohaterka mając przed sobą dwa krzesła opatrzone imionami, decyduje się usiąść na tym z napisem „Jinx”.

Jinx, aczkolwiek w warstwie dźwiękowej wybrzmiewają liczne jej rozterki, które nie są jawnie dostrzegalne w obszarze wizualnym. Jinx doświadcza charakterystycznej dla fazy lustra alienacji – obraz jej samej nie jest nią, bowiem nie ujmuje porządku symbolicznego, który w sekwencji akcentowany jest werbalnie za pomocą rozmowy z głosem formującym się w umyśle bohaterki.

Analizowana scena może być również próbą połączenia trzech porządków czasowych – przeszłości, teraźniejszości oraz przyszłości. Towarzyszące wydarzeniom wewnętrzne przeżycia Jinx odsyłają ją do czasów dzieciństwa oraz wydarzeń, w których wyniku jej kontakt z Vi został na wiele lat zerwany. W tej sytuacji rozumieć je można jako pewną reprezentację przeszłości, która chociaż usilnie wypierana, dalej zajmuje wewnątrz podmiotu własne miejsce, a z czasem staje się obcością – tym, czym podmiot już nie jest, ale jednocześnie tym, czego nie może on odrzucić. Jako przejaw teraźniejszości uznać można symbolicznie ujętego w wizualnym podobieństwie Wielkiego Innego, który na bieżąco motywuje Jinx do osiągnięcia tego, czego najbardziej pragnie, definiuje jej kolejne cele oraz wytycza trajektorię rozwoju tożsamości. We wspomnianym motywie zbieżności szukać można również odniesień do przyszłości. Z czasem bohaterka poniekąd zajmuje miejsce Silco i staje się w Zaunie twarzą toczącej się rebelii oraz legendą, wokół której gromadzą się walczące o wyzwolenie grupy²¹. W wielu momentach odmawia ona jednak pełnego zaangażowania się w sprawę, ponieważ pragnienia i cele uznawane przez jednostkę za własne są w gruncie rzeczy jedynie konstruktem osadzonej w podmiocie obcości.

4. ANALIZA *DROGI* Z WYKORZYSTANIEM TEORII KRISTEVEJ

W analizie *Drogi*²² Cormaca McCarthy'ego wykorzystam przedstawioną przez Kristevą teorię abiekcji. Psychoanalityczka za jeden z przykładów abiektu podaje zbrodnię, która stanie w centrum dalszych rozważań. Jej obecność zaburza porządek, bowiem obnaża kruchość prawa i podważa istotność norm moralnych:

Każda zbrodnia, ponieważ jest oznaką słabości prawa, jest wstrętna [...]. Ten, kto odrzuca moralność, nie jest wstrętny – może cechować go wielkość w amoralności, a nawet w zbrodni, manifestowanie buntu, wyzwalający i samobójczy brak poszanowania prawa. Jeśli chodzi o wstręt, jest on niemoralny, mroczny, podstępny, podejrzany: groza, która się przyczaja, nienawiść, która się uśmiecha, namietność do ciała, która je wymienia na coś innego, zamiast rozpalać, dłużnik, który was sprzedaje, przyjaciel, który wbija sztylet... [7, s. 10]

W postapokaliptycznej rzeczywistości największymi ze zbrodni okazały się te początkowe, które trwale zmieniły postrzeganie moralności. Nie miały one charakteru nieabiektalnych, buntowniczych działań wymienianych przez Kristevą, lecz wynikały z postawy przyjętej w obliczu katastrofy. Nietrwałość reguł porządkujących dotychczas świat zaznacza sam McCarthy w opisie początkowych lat po zagładzie.

²¹ Temat ten podejmowany jest w drugim sezonie serialu.

²² *Droga* jest powieścią postapokaliptyczną, w której niesprecyzowany przez autora kataklizm doprowadził do śmierci znacznej części biosfery. Rzeczywistość obserwowana jest z perspektywy dwóch bezimiennych bohaterów – ojca i syna, którzy przemierzają tereny niegdysiejszych Stanów Zjednoczonych i zmierzają na południe, uciekając przed chłodem zimy nuklearnej. Na swojej ścieżce mierzą się z wieloma trudnościami, również tymi natury moralnej.

W pierwszych latach drogi zaludniali uchodźcy zakutani w warstwy ubrań. Łachmaniarze w maskach i goglach, siedzący na poboczach jak lotnicy po katastrofie. Ze stosami barachła na taczkach. Ciągnęli furmanki i wozy. Oczy rozbliły w czaszkach. Bezwyznaniowe ludzkie skorupy drepczące po szosach jak wysiedleńcy w kraju pustoszonej przez wojnę domową. Wreszcie odsłoniła się kruchość wszystkiego. Zadawnione problemy rozsądzone przez nicość i noc [11, s. 30].

Dla starszego z głównych bohaterów początek apokalipsy był kluczowym momentem, w którym wraz ze wszystkimi ludźmi stanął przed dylematem dotyczącym tego, w jaki sposób postępować należy w nowym porządku. Po przeciwnych stronach znajdowały się moralność starego świata (skojarzona z dobrocią, pomocą, brakiem działania na szkodę drugiego człowieka) oraz przetrwanie za wszelką cenę (między innymi kanibalizm, przemoc względem innych ludzi oraz ich dehumanizacja). Ojciec w tej sytuacji radykalnie zrezygnował z nieetycznych zachowań i zdecydował się pozostać przy wartościach znanych sprzed zagłady, a dzięki opowieściom z minionej rzeczywistości zaszczerpia on w swoim synu podobną postawę: „Siedzieli rozgrzani w swoim schronieniu, a mężczyzna opowiadał chłopcu historie. Były to stare historie o odwadze i sprawiedliwości, które zapamiętał” [11, s. 42]. Bohaterowie wiele razy w toku powieści mówią o sobie, że są tymi, którzy niosą ogień. W ten sposób metaforycznie określają swoją przynależność do grupy dobrych ludzi, przeciwstawiając się większości ocalałych podążającej ścieżką odrzucającą obowiązujące przed katastrofą definicje moralności.

Jawnie wytyczone za pomocą słów linie podziału okazują się jednak rozmyte i niejednoznaczne w momencie konfrontacji bohaterów z własnym odbiciem lustrzanym. Podczas swojej podróży odnajdują oni budynek, w którym znienacka dostrzegają w zwierciadle wizerunek samych siebie: „Na przeciwległym krańcu miasta natrafili na dom stojący samotnie w polu; zbliżyli się, weszli do środka i przemaszzerowali przez pokoje. Natknęli się na własne odbicie w lustrze – prawie uniósł rewolwer. To my, tatusiu, szepnął chłopiec. To my”²³ [11, s. 124]. Początkowo można by sądzić, że taka reakcja spowodowana jest po prostu zaskoczeniem wywołanym nagłym dostrzeżeniem naprzeciw siebie ludzi, co w warunkach postapokaliptycznych niejednokrotnie wiąże się z potencjalnym zagrożeniem. Moment ten wydaje się jednak o wiele bardziej znaczący, co znakomicie ujmuje Stephen Joyce, wskazując na rosnącą zbieżność między zachowaniem ojca a działaniami złych ludzi:

W trakcie wypełniania misji polegającej na ochronie chłopca mężczyzna staje się niemal nieodróżnialny od złych ludzi, przed którymi ostrzega on swojego syna. Przydrożne gangi usprawiedliwiają swoje działania przetrwaniem; mężczyzna usprawiedliwia własne przetrwanie swojego syna. Wspomniana różnica wraz z tokiem powieści staje się coraz mniejsza²⁴ [12, s. 10].

Mężczyzna niejednokrotnie odmawia pomocy napotkanym na drodze ludziom, zabija człowieka, gdy ten grozi jego synowi, a w kluczowym momencie nie okazuje miłosierdzia i prawdopodobnie doprowadza swoim postępowaniem do śmierci złodzieja, który próbował ukraść ich zapasy. Przywołana wyżej myśl Joyce’a podkreśla płynność i nietrwałość granic

²³ Dialogi w powieści często nie są wyróżnione typograficznie. W artykule przywołuję oryginalny wygląd fragmentów dzieła.

²⁴ Cytat oryginalny: „In the man’s quest to protect the boy he becomes almost indistinguishable from »the bad guys« he continually warns his son against. The road gangs justify their actions in the name of survival; the man justifies his actions in the name of his son’s survival. The difference becomes increasingly small as the novel progresses”.

między podmiotem a tym, co odrzuca. Stanowcze nakreślenie ostrej linii podziału w początkowych latach apokalipsy, będące wynikiem niezgody na zachowania stojące w sprzeczności z dawnymi normami moralnymi, jest nieustannie podważane i w kluczowych momentach poddawane rewizji, a tożsamość bohaterów redefiniowana z każdym ich działaniem.

Moment konfrontacji z samym sobą nie pozostaje bez znaczenia dla bohaterów. Najbardziej wymowna jest odmowa syna, gdy ojciec proponuje mu opowiedzenie kolejnej historii:

Chcesz, żebym ci opowiedział pewną historię?

Nie.

Dlaczego nie?

Chłopiec spojrzał na niego, a potem odwrócił wzrok.

Dlaczego nie?

Bo te historie nie są prawdziwe.

Nie muszą być prawdziwe. To są historie.

Tak, ale w tych historiach my zawsze pomagamy ludziom, a przecież nie pomagamy [11, s. 249].

W tym przypadku nie jest to jedynie odrzucenie opowieści, ale odrzucenie pewnego fałszu czy iluzji i niezgoda na budowanie na ich fundamentach nieprawdziwej tożsamości oraz załamującej się w decydujących chwilach moralności. Syn niejednokrotnie sprzeciwia się działaniom proponowanym przez ojca, jednak ten zazwyczaj odrzuca jego sugestie, co finalnie prowadzi do obserwowanej rozbieżności między rzeczywistością a wyimaginowaną tożsamością. Przytoczony wyżej fragment jest momentem kulminacyjnym zaistniałej niezgody, w którym syn piętnuje zachowania własnego ojca z wykorzystaniem wykształconego przez niego narzędzia – „[...] dzięki historiom chłopiec rozwija poczucie moralności, które umożliwia mu krytykowanie zachowań ojca”²⁵ [12, s. 13]. Sytuacja ta to akt uczciwego spojrzenia na samych siebie oraz moment, w którym bohaterom przypominają się sytuacje, gdy podejmowane przez ojca decyzje były sprzeczne z deklarowanym systemem moralnym. Unaczynia ona, że jednorazowe określenie przestrzeganych wartości nie ma znaczenia, jeżeli podejmowane działania są z nimi sprzeczne. O podmiocie świadczą bowiem redefiniujące go wybory podejmowane w kluczowych momentach.

Bohaterowie *Drogi* dzięki konfrontacji z własnym odbiciem dostrzegają, że to, co dotychczas uznawali za obcość względem nich zewnętrzną, nie jest w gruncie rzeczy tak odległe, ponieważ ta sama obcość obecna jest w nich samych – wraz z tokiem powieści upodabniają się oni do tych, od których tak usilnie się odgradzali. Dzięki nieustannemu powtarzaniu, że są oni dobrymi ludźmi i tymi, którzy niosą ogień, ojciec z synem chcą wyprzeć się odpychającej dla nich obcości. Zwierciadło uświadamia im jednak kształt ich prawdziwej natury i przypomina, że tożsamość nie jest czymś stałym, a podlegającym przemianom i ciągle zmieniającym swoją formę.

5. ZAKOŃCZENIE

W obu analizach zastosowanie narzędzi psychoanalitycznych pozwoliło na odszukanie możliwych odczytań motywu odbicia lustrzanego w dziełach kultury i powiązanie ich z aspektem wewnętrznych przeżyć bohaterów, a w szczególności – z obszarem skrytej wewnątrz nich

²⁵ Cytat oryginalny: „[...] it is through stories that the boy develops a moral sense that allows him to criticize his father's actions”.

obcości. Zwierciadlany obraz umożliwia odbiorcom treści dostrzec czasem nieoczywistą głębię kreacji postaci. Dla twórców stanowi natomiast narzędzie wprowadzające interesujące rozwiązania narracyjne. Konfrontacja bohaterów z własnym wizerunkiem uświadamia im niewidoczne na pierwszy rzut oka prawdy oraz jest katalizatorem zachodzących później zmian.

W *Arcane* wizualna zbieżność podobizn Jinx i Silco, wykreowana za pomocą pękniętego zwierciadła, zwraca uwagę na ich paralelne ścieżki życiowe, dynamikę relacji między nimi, a w szczególności podkreśla wpływ, jaki na siebie wywierają. Wykorzystane w analizie Lacanowskie pojęcia Wielkiego Innego i małego innego oraz obiektu małego *a* umożliwiają zrozumienie mechanizmów psychicznych, które definiują podejmowane przez bohaterów działania i ukazują głębię ich kreacji. Przyjrzenie się zarówno warstwie wizualnej, jak i dźwiękowej pozwala z kolei odszukać zjawisko alienacji, charakterystyczne dla fazy lustra.

Droga natomiast ukazuje sytuację, w której dzięki zwierciadlanemu obrazowi ojciec i syn dostrzegają ukrytą dotąd prawdę, u której źródeł leżą mechanizmy abiekcji opisane przez Kristevą. Własne odbicie ujawnia w tym przypadku nietrwałość i iluzoryczność tożsamości ukształtowanych w wyniku odczuwania silnego wstrętu względem braku moralności w świecie postapokaliptycznym. Pokazuje ono, że system wartości pieczołowicie budowany za pomocą słów, ale pozostający bez pokrycia w czynach, jest jedynie pojęciową fasadą, za którą chowają się protagoniści. Wówczas obcość postrzegana jako coś zupełnie zewnętrznego daje się odnaleźć niezwykle blisko – we własnym wnętrzu. To uświadomienie rezonuje w umysłach bohaterów i w konsekwencji prowadzi do zmian w dynamice relacji między nimi.

Przedstawione interpretacje stanowią próbę połączenia niezwykle rozległych obszarów badawczych, którymi są psychoanaliza oraz studia nad obcością, za pomocą konkretnego rekwizytu – lustra. Tak obszerne zaplecze teoretyczne stwarza podstawy do przyszłych analiz. Wkomponowanie w aparat pojęciowy innych myśli i terminów psychoanalitycznych (jak pokazuje przykład abiektu niekoniecznie wprost związanych z aspektem własnego wizerunku) pozwoliłoby na nowe interpretacje tematu i umożliwiło odmienne rozszyfrowanie motywu obcości intrapersonalnej w tekstach kultury.

LITERATURA

- [1] Rimbaud A., *Correspondance: Lettre du Voyant, à Paul Demeny, 15 mai 1871*, [w:] Gilbert-Lecomte R. (ed.), *Correspondance inédite (1870–1875) d'Arthur Rimbaud*, Éditions des cahiers libres, Paris 1929.
- [2] Evans D., *An introductory dictionary of Lacanian psychoanalysis*, Routledge, London 1996.
- [3] Lacan J., *A, m, a, S*, [w:] Miller J.-A. (ed.), *The seminar of Jacques Lacan. Book II. The ego in Freud's theory and in the technique of psychoanalysis. 1954–1955*, transl. Tomaselli S., W.W. Norton & Company, New York 1991, s. 309–326.
- [4] Lacan J., *Écrits: A selection*, transl. Fink B., W.W. Norton & Company, New York 2006.
- [5] Lacan J., *From the Cosmos to the Unheimliche*, [w:] Miller J.-A. (ed.), *The seminar of Jacques Lacan. Book X. Anxiety*, transl. Price A.R., Polity Press, Cambridge 2014, s. 29–42.

- [6] Lacan J., *My teaching*, transl. Macey D., Verso Books, London 2008.
- [7] Kristeva J., *Potęga obrzydzenia. Esej o wstręcie*, przekł. Falski M., Wydawnictwo Uniwersytetu Jagiellońskiego, Kraków 2007.
- [8] Felluga, D., 2011, *Modules on Kristeva. II: on the abject*, Introductory Guide to Critical Theory, <https://www.cla.purdue.edu/academic/english/theory/psychoanalysis/kristevaabject.html> [dostęp: 17.02.2025].
- [9] Chanter T., *Context. Philosophies of dialogue and psychoanalytic thought: The impossibility of thinking 'I' without the other*, [w:] Herrmann S. et al. (ed.), *The Routledge handbook of political phenomenology*, Routledge, New York 2024, s. 279–289.
- [10] Charue P. et al. (reż.), *Arcane*, 2021–2024, Fortiche Production, Netflix.
- [11] McCarthy C., *Droga*, przekł. R. Sudół, Wydawnictwo Literackie, Kraków 2022.
- [12] Joyce S., *The double death of humanity in Cormac McCarthy's The Road*, *Transatlantica. Revue d'études américaines. American Studies Journal*, vol. 2, 2016, s. 1–16, <https://doi.org/10.4000/transatlantica.8386>.

GEOEDUCATIONAL TOOL FOR GEOTOURISM NEEDS – A FILM ILLUSTRATING THE ORIGIN OF SANDSTONE-CONGLOMERATIC DEPOSITS OF THE CARPATHIAN ROCKY FORMS

The relic landforms of the Carpathians, developed in the form of amalgamated massive sandstones and conglomerates, represent the so-called Carpathian flysch. Considering that, in research on deep-water clastic sediments there is a paradigm of turbiditic genesis of massive flysch-type deposits and there are also views on a possible non-turbiditic origin of such siliciclastic lithofacies, researches have been undertaken to clarify their actual process-based genesis. Conducted flume experimental modelling has made it possible to document the transport-depositional mechanism responsible for the formation of massive sandy-gravelly sediments and the development of their accumulation system tract. The creation of an interactive geo-educational tool as a film with geointerpretation has enabled a comprehensive clarification of the controversial sedimentological interpretations of such developed rocky forms deposits. Observations of linearly supplied mass sediment gravity flows generated under laboratory conditions, which resemble subaqueous sandy-gravelly ‘avalanches’, suggest that tor deposits originate from laminar (non-turbulent) debris flows taking the form of tongues forming clastic covers in an apron system. The massive products of gravity-driven redeposition processes of sandy-gravelly material should be termed sandstone-conglomeratic debrites, i.e., non-cohesive debrites (rather than turbidites or fluxoturbidites).

NARZĘDZIE GEOEDUKACYJNE NA POTRZEBY GEOTURYSTYKI – FILM OBRAZUJĄCY POCHODZENIE PIASKOWCOWO-ZLEPIENCOWYCH UTWORÓW KARPACKICH FORM SKAŁKOWYCH

Biorąc pod uwagę, że w badaniach nad głębokowodnymi osadami klastycznymi funkcjonuje paradygmat o turbidytowej genezie masywnych utworów typu fliszowego oraz obecne są poglądy o możliwym innym niż turbidytowe pochodzeniu takich litofacji silikoklastycznych, podjęto prace mające na celu wyjaśnienie ich faktycznej genezy procesowej. Przeprowadzone eksperymentalne modelowania korytowe pozwoliły na udokumentowanie mechanizmu transportowo-depozycyjnego odpowiedzialnego za powstanie masywnych osadów piaskowo-żwirowych. Stworzenie interaktywnego narzędzia geoedukacyjnego w formie filmu z geointerpretacją umożliwiło kompleksowe wyjaśnienie kontrowersyjnych interpretacji sedymentologicznych. Obserwacje generowanych w warunkach laboratoryjnych liniowo zasilanych, masowych spływów grawitacyjnych osadu o charakterze subakwalnych „lawin” piaskowo-żwirowych sugerują, że utwory skałkowe powstawały z laminarnych (nieturbulentnych) spływów rumoszowych przybierających formę języków formujących pokrywy klastyczne w systemie fartuchowym. Masywne produkty procesów grawitacyjnej redepozycji materiału piaskowo-żwirowego powinny być zatem określane mianem debrytów piaskowcowo-zlepińcowych, tzn. debrytów niekohezyjnych (a nie turbidytów czy fluksoturbidytów).

* AGH University of Krakow, Faculty of Geology, Geophysics and Environmental Protection, Student Scientific Association of “Geotourism”, Student Scientific Association of Geological and Computer Cartography “Azymut”.

** AGH University of Krakow, Faculty of Geology, Geophysics and Environmental Protection.

1. INTRODUCTION

Based on the experience of previous turbidity flows modelling and their satisfactory results [1–3], an attempt was made to experimentally reproduce another type of sediment gravity flow – sandy-gravelly debris flow [4, 5]. A characteristic feature of such flow products – sandy-gravelly debrites – is primarily the massive structure (i.e., in the form of randomly dispersed grains in a background of detrital matrix) [4–32]. Such developed debritic deposits commonly form the sandstone-to-conglomeratic residual rocky forms of the Outer Carpathians [32–37].

The aim of the project was therefore to design an interactive (stopping, rewinding, looping and repeating) film-based geoeducational tool with geointerpretative content [1–5], considering the genesis of such developed deposits.

The motivation for conducting new modelling of selected sedimentary processes, which intended to document and explain the formation of sediments with a structure comparable to the aforementioned sandstone-to-conglomeratic deposits, was the geotourist interest in the Carpathian tors (Fig. 1) and the possibility of using this fact to popularise knowledge in the field of broadly understood Earth Sciences and implement geoeducation in this area [e.g., 32–43]. An additional motivational aspect was also the prevailing interpretative discrepancies, manifested in the form of parallel published views on the different origins of rocky forms deposits representing a variety of coarse-clastic, thick-bedded, and amalgamated flysch [4–32].

Already in the pioneering sedimentological investigations [6–13] – sediment gravity flows with different mechanisms of supporting grains in transportational moving, associated not only with turbulence *sensu stricto* (the state of turbulent motion), were described and interpreted differently.

Therefore, for the purposes of geotourism promotion and geoeducation dissemination [1–5, 32–43], as well as to clarify genetic doubts, particularly related to the paradigm of turbiditic genesis of the aforementioned massive sandstone-to-conglomeratic deep-water deposits (i.e., developing beyond the edge of the contractual ‘shelf’ – in the slope, its base, and proximal basin plain zone) [6–8, 10, 15–17, 44], which has prevailed for over half a century in research on deep-sea siliciclastics – experimental laboratory works were undertaken to visually determine the actual mechanism of the gravitational transport-depositional process responsible for the formation of sediments corresponding to the flysch deposits of the Carpathian relic rocky forms.

The geoeducational tool presented in this article was the subject of a conference presentation during a session ‘Geology and Geotourism’ at the 65th Barbórkowa Konferencja Studentkich Kół Naukowych AGH [4, 5]. Additionally, this article discusses the sedimentological aspect of processes and their deposits (sedimentary products) in the context of the design and production of a film-based geoeducational tool.

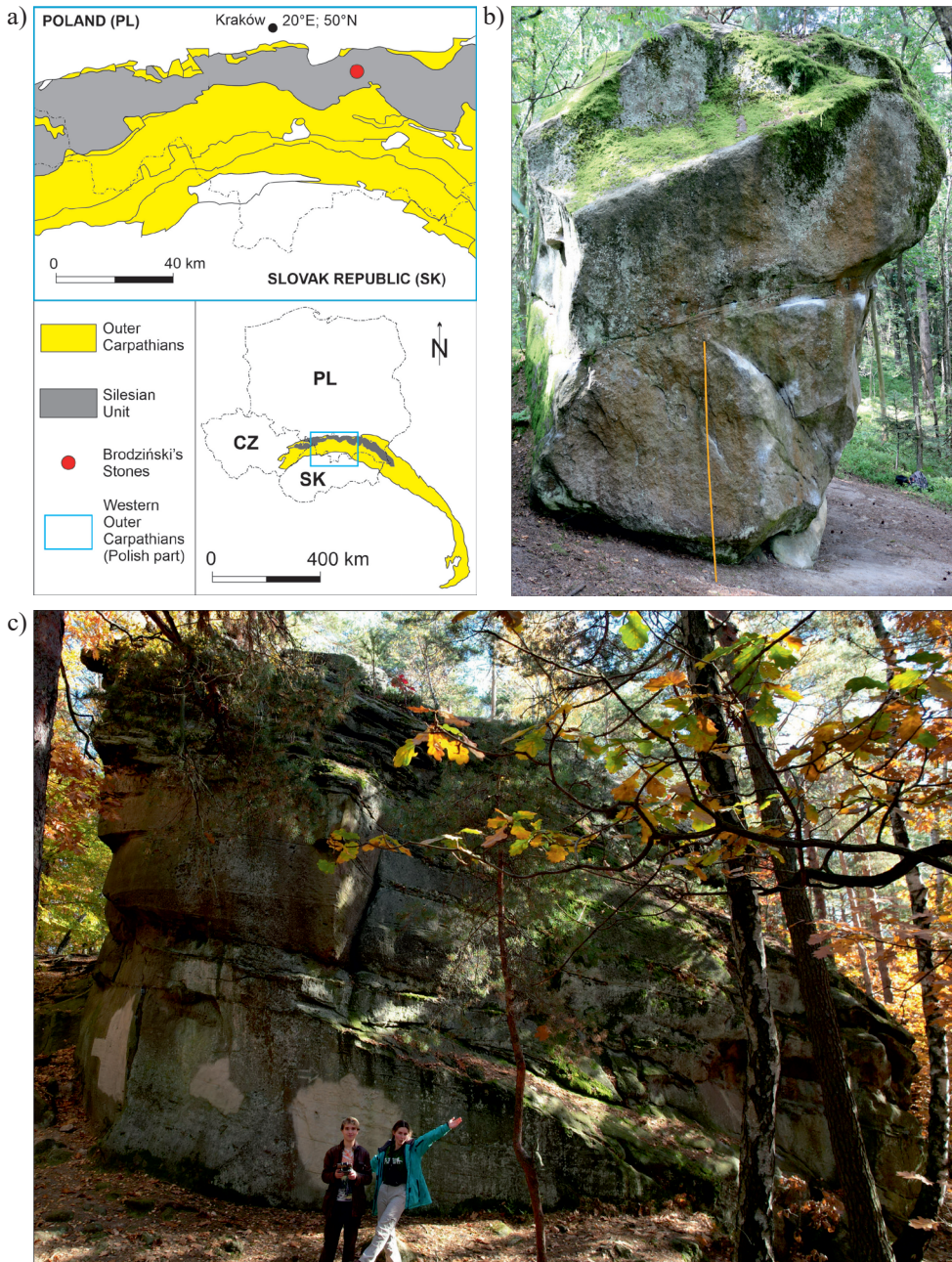


Fig. 1. Residual rocky forms built of sandstone-conglomeratic flysch deposits (Istebna Fm.): a) location and geological setting of the study area (Brodziński's Stones) (source: [29] and references cited there in (fig. 1, p. 160), modified); b) Gnome (Gnom) (the yellow gauge is 2 meters) (GPS: 49,847918°N; 20,481422°E); c) Big Stone (Wielki Kamień) [5], (GPS: 49,848223°N; 20,479146°E) (phot. Z. Ziarek, 2024)

2. METHODS

The methodics for designing the geoeducational tool in the form of film was based on field-work conducted in a selected area where representative Carpathian sandstone-conglomeratic residual rocky forms occur (GPS coordinates were collected) (Fig. 1) [32, 33, 36]. In order to compare the development of the rocky forms deposits to the experimental sediments, for the geoeducational film tool needs, it was necessary to carry out detailed lithological-sedimentological observations of the first mentioned ones. In the selected area of the Wiśnicz Foothill (Lipnica Górna, Paprotna hill) 10 rocky outcrops were identified, their photographic documentation was made, and one tor (representative in terms of characteristic textural- and structural features development) was additionally logged.

After familiarising with the textural-structural characteristics of the deposits forming the residual rocky forms, the planning of a scenario for laboratory flume modelling was initiated. Modelling the sedimentary process, intended to reflect the genesis of the studied rocky forms deposits, required the creation of an experimental 'proving ground'. An appropriate mini-sedimentological laboratory was designed [4, 5].

The new project of the geoeducational tool (film illustrating sandy-gravelly debris flows) for geotourism was based on the idea of geoeducation, which involves the popularisation of geological knowledge through the exploration of inanimate nature objects and/or the processes responsible for their genesis, considered touristically attractive [1–5, 32–43].

The proposed tool, by visualising the process and its product, was designed to explain the nature of the physical sedimentary process responsible for the formation of massive sandy-gravelly sediments, which are analogues for the massive sandstone-conglomeratic deposits of residual rocky forms representing as an example of one of the types of flysch that build the Outer Carpathians (the so-called Flysch Carpathians) [9, 11, 14, 17, 20, 27–29, 32–37, 40–43, 45–48].

2.1. STAGES OF DESIGNING GEOEDUCATIONAL TOOL

The film-based geoeducational tool was intended to illustrate and explain to the audience the sedimentary environment, in which massive, amalgamated sandstone-conglomeratic flysch deposits were created, the gravitational processes involved, the type of granular material, and the depositional system tract in which they were formed. Accordingly, the entire project work was divided into sequentially implemented stages:

1. Establishing the subject of geoeducation, geoeducational objectives, presentation methods, and target audience characteristics.
2. Selection of thematic issues and physical features of the objects/material elements to be presented and explained.
3. Conceptual stage – a review of knowledge in the field of deep-water (outside from the shelf) siliciclastic sedimentology and geoeducational methods.
4. Laboratory stage – design of sedimentological modelling, testing of the analogue model, and making adjustments.
5. Production stage – recording films from three perspectives, developing geointerpretation (text, graphics, individual film fragments and freeze frames), and final montage of the tool.

Finally, the designed and produced multimedia film-text geoeducational tool represents a comprehensive geotourism product.

2.2. SEDIMENTOLOGICAL METHODS

The sedimentological research was based on the concept of process sedimentology [1–5, 21–25, 29, 37], where the approach – ‘from detail to general’ – includes the necessary conditions such as:

- 1) detailed factual description (lithological-sedimentological characteristics) of products – sandstone-to-conglomeratic deposits of the Carpathian residual rocky forms,
- 2) interpretation of products towards determining their genesis – environment, sedimentary processes, transport-depositional mechanisms,
- 3) creation of a general model of accumulation system tract, not contradicting field observations of product characteristics.

The final model is intended to illustrate, in a simplified and clear manner, the prevailing environmental conditions and ongoing geological processes within it, and to show their result in the form of sedimentary products. Therefore, during modelling, consistency with reality must be maintained, to such a degree of approximation that the analysed process and its product (rock deposits) are as naturalistic as possible – could occur under natural conditions.

3. CARPATHIAN FLYSCH GENESIS AS A SUBJECT OF GEOEDUCATION IN GEOTOURISM

The development of geotourism, understood as thematic tourism based on the tourist's interest in the surrounding landscape, its structure, and genesis – creates a need to provide knowledge about the processes and their mechanisms that led to the formation of the geotourism objects and attractions seen today. Geosites that are visually appealing and located in areas accessible to tourist traffic, such as in the Flysch Carpathians (Fig. 2), are particularly predestined to such development.

Tourist access to Carpathian flysch geosites, such as the Lhota beds inactive quarry in Kozy (Fig. 2a) or the Istebna sandstone-conglomeratic residual rocky forms in Lipnica Górna (Fig. 2b), arouses curiosity and questions among visitors about the reasons for their different external appearance and lithological-sedimentological development. Based on scientific research on Carpathian flysch deposits conducted over many years, extensive knowledge about the environments and mechanisms of the processes responsible for shaping the products observed today (Carpathian sandstone-to-conglomeratic residual rocky forms), is available. In order to design a geoeducational film tool, it was necessary to refer to the development of Carpathian relic forms deposits and interpret their genesis.

Sedimentation in the Outer Carpathian sub-basins (a marginal fragment of the Tethys Ocean) occurred during simultaneous changes in the geotectonic regime, under different geometric and bathymetric conditions, with the involvement of varying sedimentary processes, and at different distances from alimentary zones (source areas). Consequently, texturally and mineralogically diverse terrigenous clastic material was delivered to the sedimentary basins, sometimes with a significant proportion of exotics (macroscopically recognisable outsized clasts of crystalline rocks and older sedimentary rocks) [9, 11, 14, 17, 20, 27–29, 32–37, 40–43, 45–48].

Therefore, flysch can be considered from different points of view:

- lithologic – series of sedimentary rocks consisting mainly of interbedded siliciclastics of varying fractions (psammitic, psammitic, aleuritic, and/or pelitic), developed as alternating sandstones and shales (mudstones and/or claystones) or amalgamated coarse-clastic deposits (conglomerates and sandstones with transitional members, i.e., sandy conglomerates and conglomeratic sandstones), locally with gravelly mudstone interbeds (sometimes with clasts of exotic rocks – exotics), and to a lesser extent as separate series of marls or cherts;
- genetic – a set of deep-sea (from the edge of the contractual ‘shelf’ towards the open sea) deposits, formed from terrigenous material, created with the dominant participation of sediment gravity events (i.a., slumping, sliding, debris flows or turbidity flows) and reworking by tractional bottom currents of previously deposited material;
- geotectonic – thick (measured in hundreds to several thousand meters) series of sedimentary rocks formed in the pre- or early orogenic stage of the development of sedimentary basins (closure of basins, source area uplift and denudation).

The geoeducational tool illustrates the genesis of one type of flysch, specifically the environmental conditions of its formation, transport-depositional mechanisms, final sedimentary products, and system their accumulation.



Fig. 2. Outcrops representing two contrastingly developed types of Carpathian flysch:
a) rhythmic interbeddings of sandstone and mudstone layers (Lhoty Fm.), inactive quarry in Kozy near Bielsko-Biala city; b) amalgamated sandstone-conglomeratic deposits without mudstone interbeds separating them (Istebna Fm., Brodziński's Stones in Lipnica Górna near Wiśnicz city) (phot. Z. Ziarek)

4. SUBAQUEOUS SEDIMENT GRAVITY FLOWS

Subaqueous sediment gravity flows are processes of transport and deposition of an incoherent (fragmented) mixture consisting of grain material and interstitial (intergranular/pore) fluids (liquids and gases) of varying volumetric concentration, taking place under the influence of gravity (comp.: [12–31, 35–37, 44–51]). Examples of such gravity-driven flows, including: 1) so-called – turbidity currents (regarded here as only low-concentrated turbulent suspensions – turbidity flows, generating a product in the form of normally-graded turbidites with flute casts at their bed base), as well as 2) debris flows (non-cohesive- or cohesive laminar flows with their products – massive debrites) (see Figs. 3–5) – experimentally modelled by authors for the purposes of this research.

Turbidity flow (*sensu* turbulent turbidity current) (Figs. 3–6) is one of the sediment gravity flow processes in which, during transport, turbulent mixing of grain material (usually mud and sand in varying proportions) with the surrounding water occurs, creating a suspension (the critical supporting mechanism is turbulence). This water-gas-grain mixture can generate and maintain a relatively stable turbulent state at a volumetric concentration not exceeding 23% [24], as, in a flow with a higher concentration (by volume), turbulence is quickly dampened or does not occur at all (cannot be initiated).

The turbulent suspension, moving gravitationally down the slope and bottom of the sedimentary basin, gradually loses its initial energy and velocity, transitioning from an erosional phase (flute casts formed by swirls) to a settling phase (normal grain-size grading formed by gradual gravitational segregation). The product of such a low-concentrated gravity turbidity flow is a turbidite with normal grain-size grading, often with flute casts (swirl scour marks) present on the bed base surface, indicating turbulent flow with eddies above the non-consolidated cohesive muddy bottom [1–3, 18–26, 29–31, 44–54].

Upon deposition of most of the transported grain material and complete cessation of the turbidity flow (i.e., after the turbulence has definitely stopped), the finest aleuritic-pelitic clastic material remains in suspension, gradually settling from a hemipelagic cloud, forming a mud layer (muddy hemipelagite).

Thus understood turbiditic sediments, together with hemipelagic mudstones (hemipelagites), and possibly with pelagic pelitic layers (pelagites), were deposited mainly in the distal zone of the sedimentary basin (at the base of the slope and on the basin plain), often in the form of depositional lobes and their margins, forming, together with a central channel (constituting a point source of supply), transitioning into branching distributary channels – a deep-sea fan system tract (Fig. 6) [1–3, 20–26, 29–31, 44–47, 49, 50].

Sandy-gravelly (non-cohesive) deep-water debris flow is one type of sediment gravity flow process (e.g., Fig. 3) [6–31]. In such debris flow, redeposited incoherent (granular) material, along with water contained in the intergranular (pore) spaces (at a volumetric concentration above 25% [24]), is transported down the basin slope in a laminar state (in contrast to the low-concentrated turbulent suspensions of turbidity flows) (Figs. 3–5, 7) [24, 29]. In this composition of non-Newtonian gravity flow, transport occurs *en masse*.

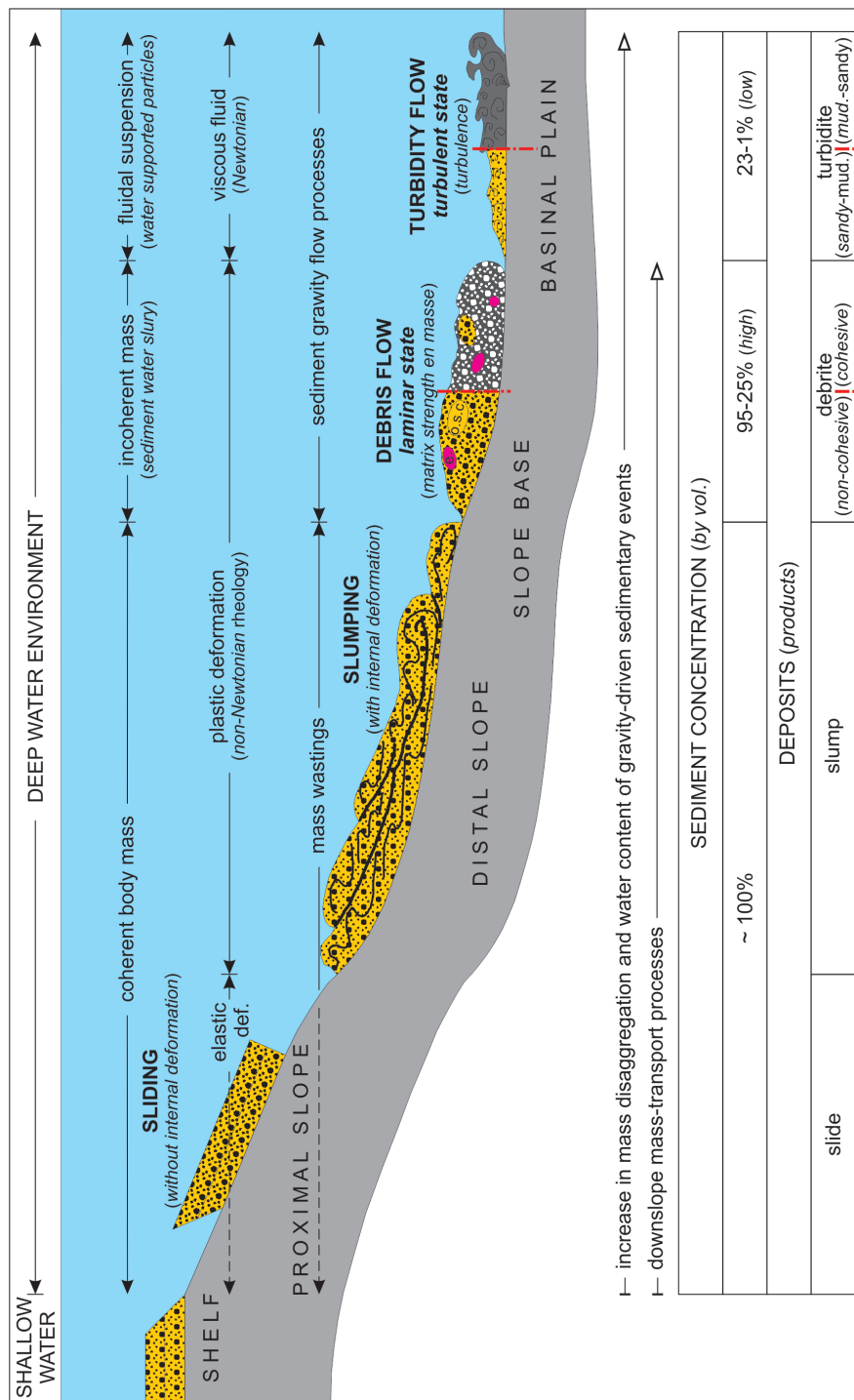


Fig. 3. Deep-water gravity-driven sedimentary gravity events: mass wastings and sediment gravity flows. Explanations: o.s.c. – outsized clasts, e. – ‘exotic’ clasts, i.e., exotics (fragments of older rocks incorporated in flow, i.a.: limestones, gneisses and/or granulites – as individual clasts or components of pre-flysch conglomerates), def. – deformation
Source: [24], modified

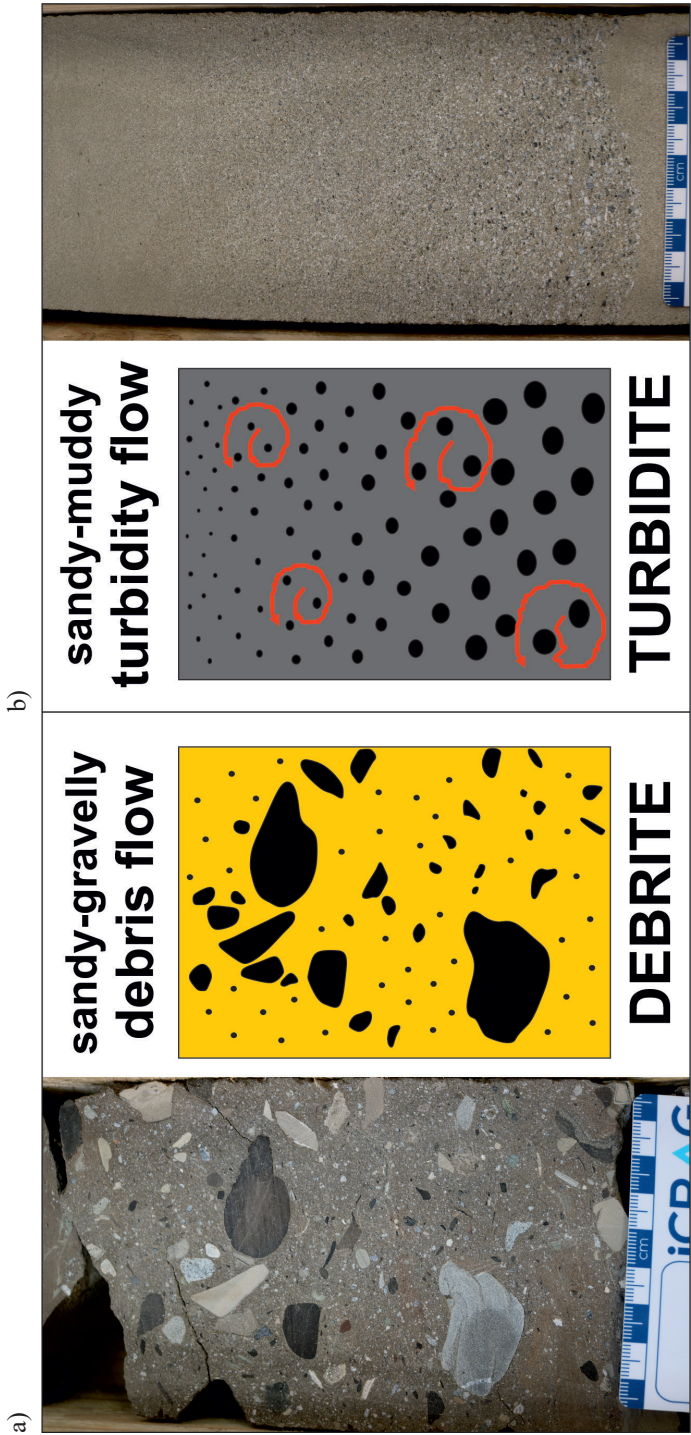


Fig. 4. Products of subaqueous sediment gravity flows:
a) non-cohesive massive debrite;
b) normally-graded turbidite (turbulence process marked by red lines)
(phot. Z. Ziarek)
Source: [24], changed

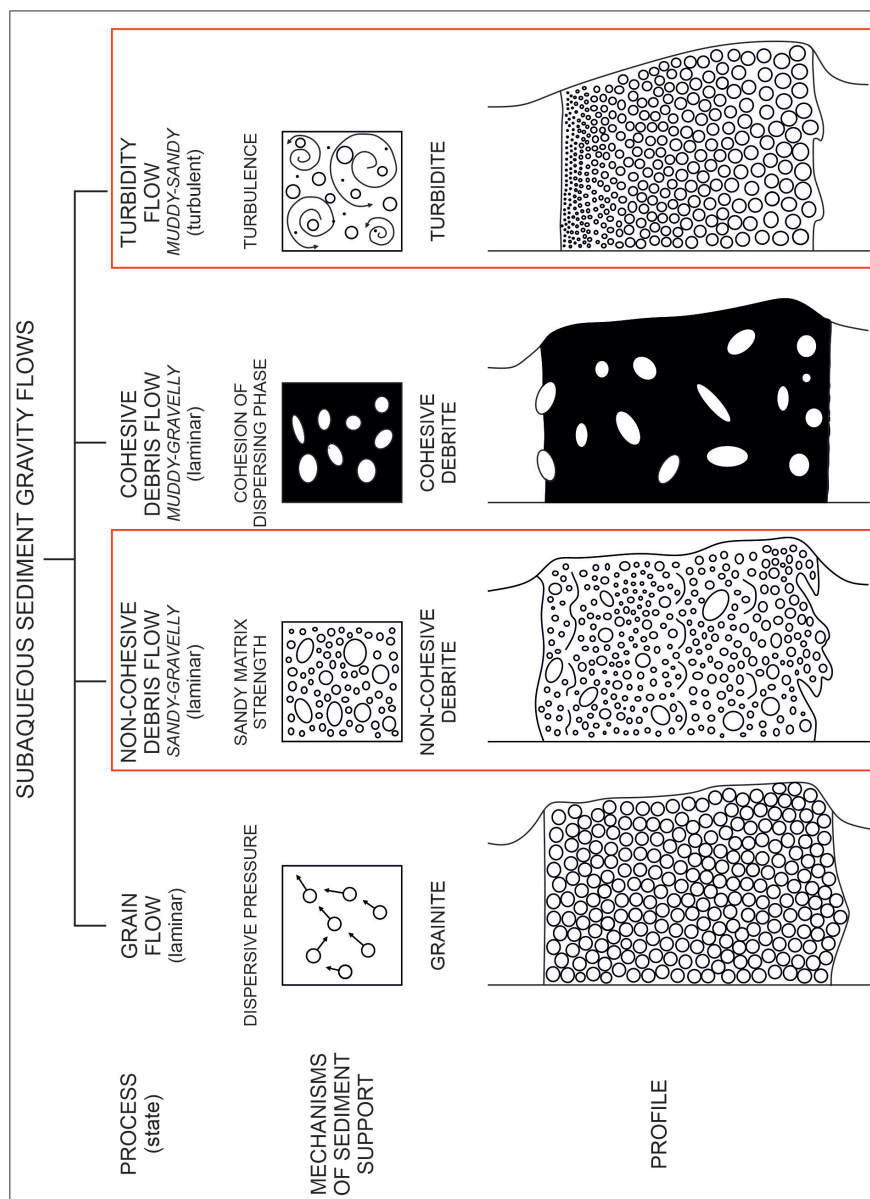


Fig. 5. Types of subaqueous sediment gravity flows, critical mechanisms supporting the transport of sediment particles / grains, and diagnostic products.
The processes, mechanisms and products discussed are marked in red

Source: [51], changed

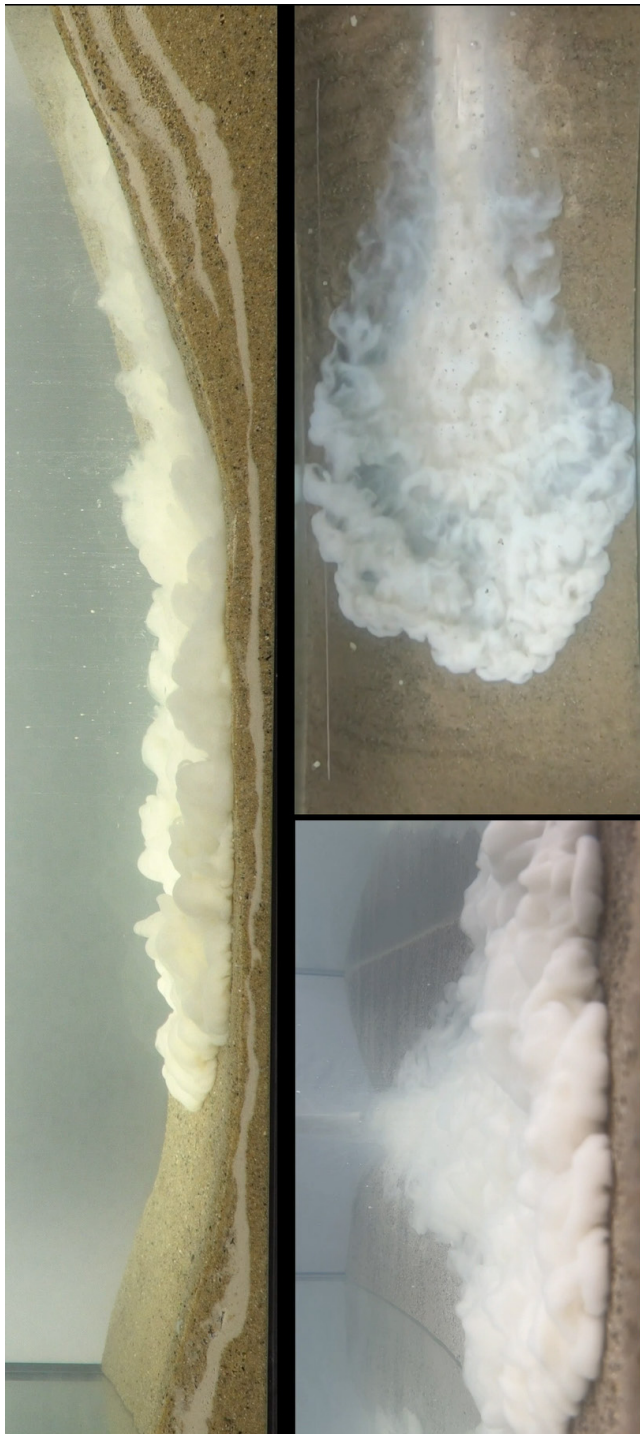


Fig. 6. Modelling low-concentrated, turbulent sediment gravity-driven flow (turbidity flow), spreading in the form of point-sourced fan-shaped deep-water system tract [1–3]
(phot. K. Kulik)



Fig. 7. Modelled mass sandy-gravelly sediment gravity flows (non-cohesive debris flows) and their products – massive sandy-gravelly deposits (non-cohesive debris) (phot. Z. Ziarek)

Under conditions of high volumetric concentration of such a non-cohesive mass flow, the mechanism that sustains the movement and the randomly scattered gravel grains in the support, including outsized clasts (constituting the dispersed phase), in suspension is mainly the strength of the sandy matrix, which acts as the dispersing phase. A highly concentrated and high-energy mixture of sandy-gravelly sediment and water, possessing effective erosional force (incorporation of older sediments), moves gravitationally down the slope of the sedimentary basin, then undergoes rapid deceleration and mass deposition, resembling an avalanche and ‘freeze’ of its colluvium. The products of a sandy-to-gravelly debris flows (mass, laminar, non-cohesive debris flows) are a sandstone-to-conglomeratic debrites. Deposits characterised by such a course of the sedimentary processes have a massive structure (lack of gradual gravitational segregation of high-concentrated clastic material sustained by matrix strength during transport and rapid mass deposition). It is that type of coarse-clastic, massive, irregularly bedded, and amalgamated sandstone-conglomeratic flysch deposits (non-cohesive debrites) [4, 5, 23–25, 27–29, 32] that constitutes the primary building material of residual rocky forms, which have enjoyed constant and even growing geotouristic interest in recent years [32, 35–37].

In addition to the varieties of sediment gravity flows products described above, massive gravelly-mudstone debrites (cohesive debrites – products of muddy-gravelly debris flows) [12, 13, 20, 23, 24, 26, 28–31, 46–48, 50, 51] (Figs. 3, 5) also locally occur among Carpathian flysch deposits, but due to their relatively low resistance to denudation factors (e.g., weathering and erosion), they are not rock-forming (they do not persist in the form of residual rocky forms).

In natural conditions, massive sandy-to-gravelly debritic deposits (sandy-, sandy-gravelly-, gravelly-sandy-, and gravelly debrites) were mainly deposited in the deep-water zone of the sedimentary basin (beyond the edge of the ‘shelf’ area), encompassing the basin slope and its base. There, they formed individual clastic tongues, which underwent lateral and vertical amalgamation (‘gluing’ together), forming cover lithosomes resembling ‘aprons’. Overlapping and coalescing piedmont apron covers formed a line-supplied apron depositional system tract of flysch deposition (Fig. 7) [4, 5, 20, 27–29, 32, 35–37, 50].

In addition to the Carpathian non-cohesive debrites – massive sandstones-to-conglomerates (i.e., debritic: sandstones, gravelly sandstones, sandy conglomerates, and conglomerates, respectively) and cohesive debrites – massive conglomeratic mudstones), there are also deep-water flysch turbidites (*sensu* mudstone-to-sandstone deposits with normal grading), the typical transport-depositional system of which is a deep-water fan (Fig. 8a) (e.g., [29]). To demonstrate the difference in their sedimentological nature (genesis and development contrast), illustrative comparisons can be used. For example, the model of a point-sourced deep-water fan system tract (Fig. 8a) could be roughly compared to a mini alluvial fan formed during rainfall (Fig. 8c). Similarly, the model of a line-supplied deep-water apron system tract (Fig. 8b) is comparable to a sandy-gravelly embankment from a construction site (warehouse) (Fig. 8d). A debris flow, on the other hand, can metaphorically be compared to public transport, where the means of transport is filled to the brim with squeezed passengers, and a turbidity flow to individual (private) transport, e.g., a personal car with comfortably travelling passengers at a distance from each other (Fig. 9) (comp. [24], fig. 2.30, p. 47).

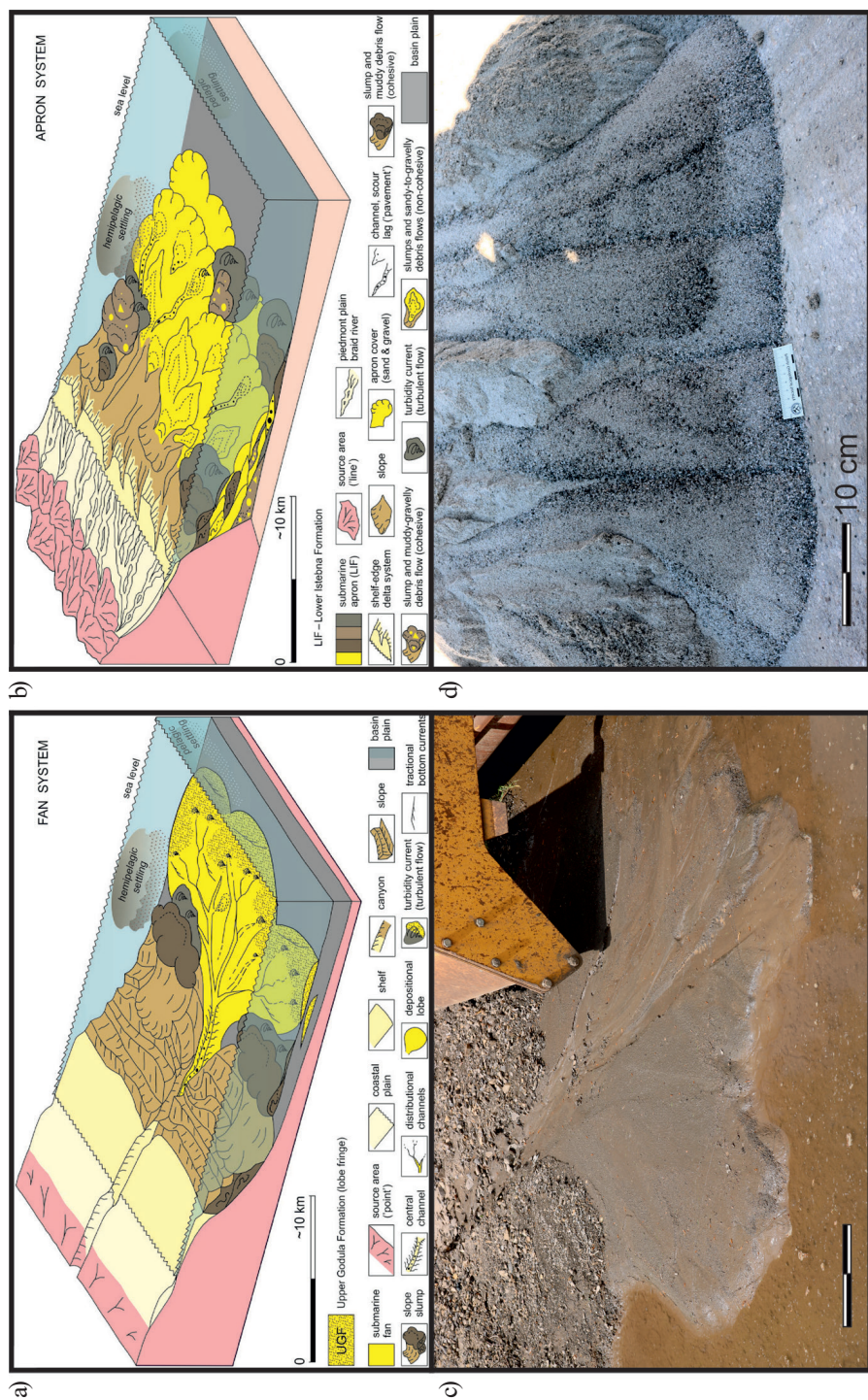


Fig. 8. Comparison of transport-depositional system tract models: a) point-sourced fan system; b) line-sourced apron system; c) naturalistic model of 'fan system'; d) naturalistic model of 'apron system'.

Source: [29] (a, b), phot. Z. Ziarek (c, d)

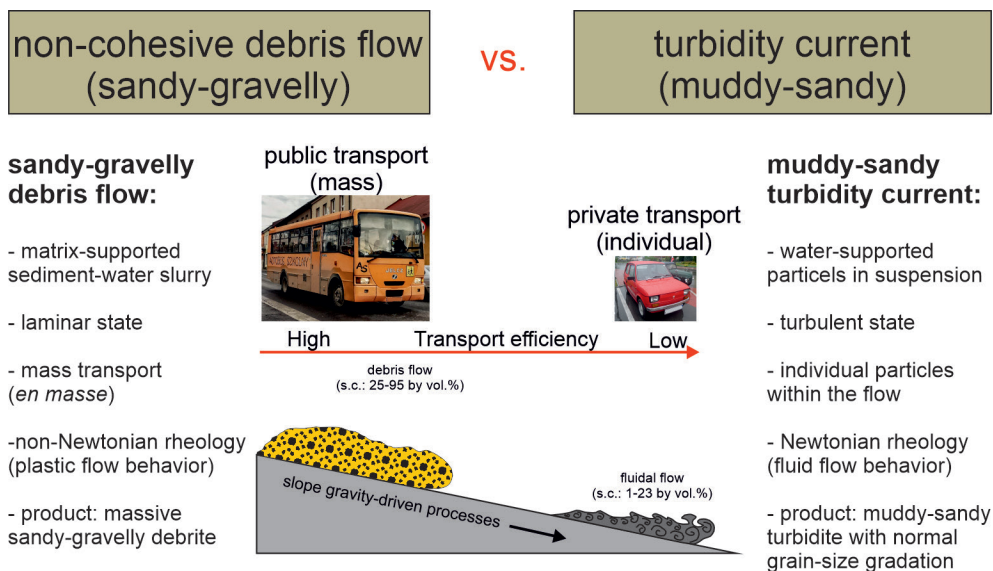


Fig. 9. Figurative comparison of debris flow and turbidity flow

Source: [24], changed

5. SANDY-GRAVELLY DEBRIS FLOW LABORATORY MODELLING

In order to create a geoeducational film illustrating and explaining the genesis of the flysch deposits building Carpathian residual rocky forms, an appropriate ‘proving ground’ (mini sedimentological laboratory with experimental flume) was designed and constructed. The subject of analogue sedimentological modelling (flume experiments) was experimentally generated mass sediment gravity flows in the form of laminar sandy-gravelly (non-cohesive) debris flows, as well as their products developed as massive sandy-gravelly deposits. These were intended to approximately correspond to identical sedimentary processes occurring in nature (i.e., in the flysch basin) and their product (after diagenesis) – massive amalgamated sandstone-conglomeratic debrites. Such developed sedimentary products represent one of the varieties of Carpathian flysch deposits (Figs. 1, 2b) [9, 11, 14, 17, 20, 27–29, 32–37, 40–43, 45–48].

Experimental reconstruction of the environmental conditions under which the process of mass gravitational redeposition of sandy-gravelly material occurred – required the preparation of appropriate equipment, materials, and multiple tests to ensure the clarity, legibility, and repeatability of the experiment with a consistent end result. Ultimately, it was possible to replicate/visualise the following elements and processes:

- sedimentary basin reservoir – aquarium with dimensions: 100 cm × 40 cm × 40 cm;
- source area, continental slope, and its base – morphology formed manually from sandy-gravelly material;
- process of triggering mass redeposition and controlling sediment gravity flows – process mechanism triggered by gradual filling of the aquarium with water, simulating marine transgression.

6. GEOEDUCATIONAL TOOL – PROJECT, GEOINTERPRETATION AND PRODUCTION

The design of the geoeducational tool was based on specific guidelines. The tool is intended for public access, is to present a strictly defined geoeducational topic, the scope of presented knowledge is to be comprehensive and clear, and its presentation method is to be understandable and adapted to the knowledge level of a student at least at the secondary school level. To achieve the intended goal, both at the tool design and production stages, research problems were identified (Tab. 1), for which solutions were developed and implemented at various stages of the project.

Table 1. Theoretical and technical problems, defined, and then solved during the project implementation

Theoretical problems	Technical problems
– Which issues should be presented and explained? – What should be the order of presented issues? – What scope and level of substantive geointerpretation should be used? – What form should geointerpretation explanations take (e.g., text, additional graphics, and animation)? – Should freeze frames with additional explanation be included?	– What camera shots should be used? – What tools should be used for film processing and editing? – How to arrange shots in a group frame? – In which part of the map should a place be designed for the geointerpretation package? – What segments should the film material be divided into? – How to choose time intervals to properly present individual processes and their products? – What video format should be used?

During the conceptual work stage, the objectives of the created geoeducational tool were defined, which then served as guidelines for the design and construction of the experimental site (mini sedimentological laboratory) for modelling non-cohesive (sandy-gravelly) debris flows. The task was set to present, using a properly constructed experimental site and conducted sedimentological experiments:

- present a model of the submarine environment (slope, its base, and the sedimentary basin plain) in which one of flysch rocks categories – massive sandstone-to-conglomeratic deposits – was hypothetically formed;
- show the gravitational mass redeposition (collapse) of rock debris from the source area (zone above the slope);
- illustrate the linear (non-point) method of delivering grain material from the source area;
- present the laminar (non-turbulent) state of sandy-gravelly material transport and the rapid (non-gradual) accumulation of rock debris mass;
- visualise the deposition of massive sandy-gravelly deposits (non-cohesive debrites in the form of coalescing debris tongues forming grain apron covers);
- demonstrate the formation of an apron (not fan shaped geometry) depositional system;

- develop geointerpretative material dedicated to the audience (e.g., geotourists);
- visualise sedimentary processes and their products for the purposes of geoeducation and popularisation in the field of Earth Sciences;
- participate in the promotion of geotourism.

During the digital processing stage creating film-based geoeducational tool (video material), visual effects were enhanced: footage from three shots was edited into a chronologically consistent visualisation of the laminar debris flow process, a portion of the screen was designated for explanatory captions, and freeze-frames were incorporated. The geointerpretative package, adequate to the observed sequence of events and adapted to the knowledge level of the defined audience, includes two categories – elements of environmental description and stages of sandy-gravelly debris flow genesis (Tab. 2) (Fig. 10).

Table 2. Geointerpretation of modelled: environment settings, processes, sedimentary products, and system tract – with assignment to individual still frames of film material

Elements of environmental description	Stages of the origin of sandy-gravelly debris flow
– Source area – the area from which the sedimentary basin receives the sedimentary material (sediment). – Linear (non-point) supply of sediment to the depositional system – delivery of the material mobilised <i>en masse</i> in different parts and time ('chaotically'). – Debris – a loose accumulation of detrital material. – Sandy-gravelly debris flow – the process of gravity-driven transport of rock debris. – Non-cohesive debris flow – flow of non-cohesive sandy-gravelly material. – Apron depositional system tract – a depositional system in the form of clastic debris covers.	– Eustatic transgression – the sea encroaches on the land due to global rising sea level. – Collapse in the source area caused by transgression – destruction of the coastal zone and delivery of rock debris to the continental slope. – Activation of a debris flow – gravity destabilises the debris material deposited on the slope, and rock debris is transported by gravity. – Amalgamation – the tongues of successive debris flows merge with each other to form covers. – Redeposition of incoherent debris – movement of un lithified (loose) sediment. – Generation of sandy-gravelly debrites – a product of non-cohesive debris flows. – Coalescence (overlapping) of debris covers – formation of an apron depositional system tract.

Film illustrating sandy-gravelly debris flows serves as an interactive geoeducational tool enabling independent use by geotourists. It allows for adjusting the pace of assimilating geointerpretative content by pausing and rewinding at any moment, looping it, and repeating the issues presented in individual film fragments and freeze frames by the viewer. The geointerpretative package includes not only descriptive elements but also graphical elements, facilitating the observation and understanding of environmental elements and the stages of debritic-type flysch genesis. The tool is publicly available as a film on the YouTube platform (https://youtu.be/VKzgJUgh6_s), and a similar geoeducational tool, based on previous modelling of turbidity flows [1–3], is exhibited in the Tatra Archives of Planet Earth (pol. Tatrzańskie Archiwum Planety Ziemia). The film geoeducational tool can be used by any viewer, especially geotourists and/or tourists interested in the genesis of the Carpathian flysch variety that builds residual rocky forms.

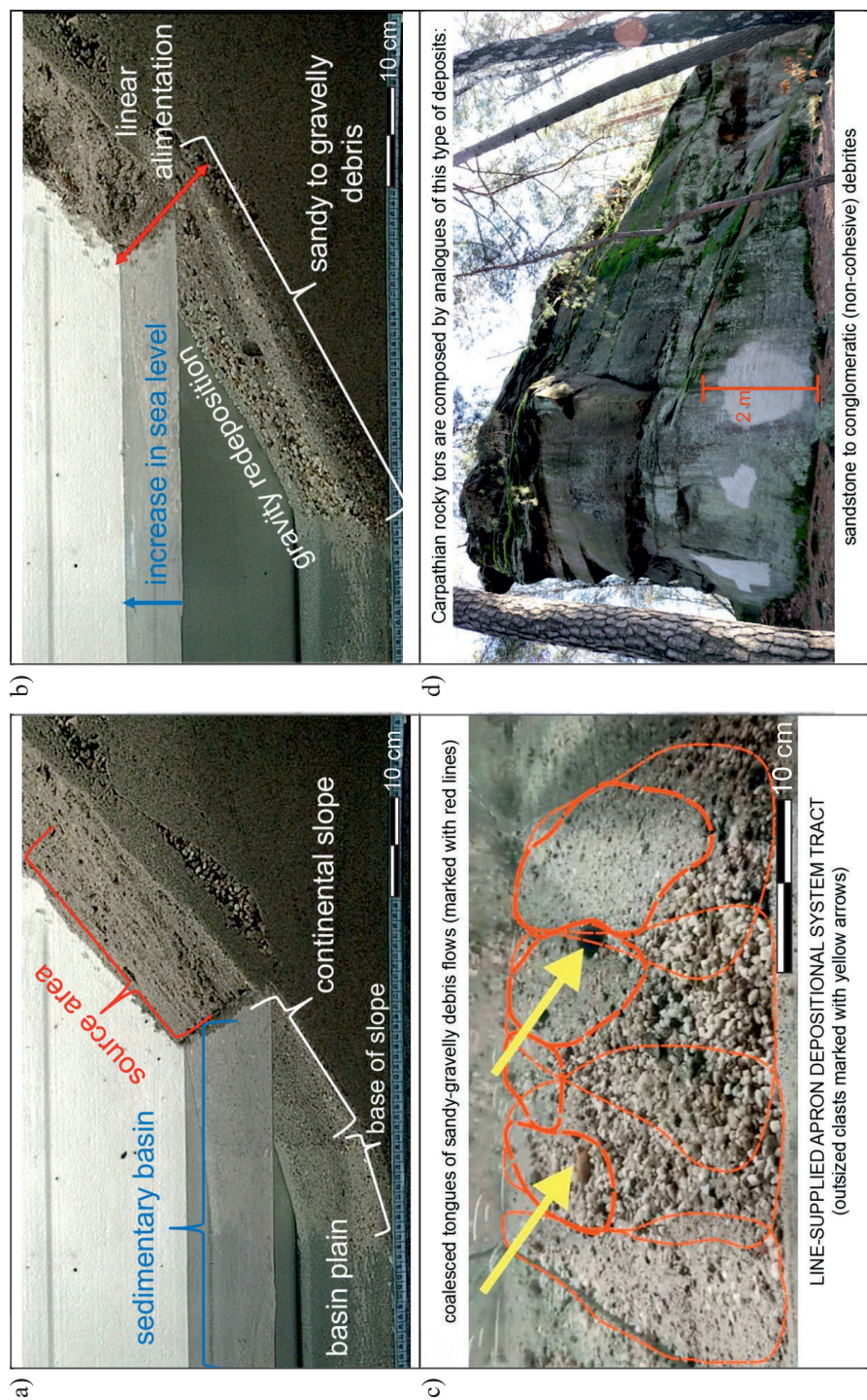


Fig. 10. Geointerpretation of visualised modelling steps: (a–c) environment, process, massive product of coarse-grained sedimentation (non-cohesive debris), and system tract; d) natural equivalent (phot. Z. Ziarek)

7. DISCUSSION

7.1. GEOEDUCATIONAL TOOL AS A BRIDGE BETWEEN SCIENTIFIC RESEARCH AND POPULARISATION OF KNOWLEDGE

The geoeducational tool aligns with the idea of a geotourism product [55, 56], and should therefore possess the following characteristics:

- focus on geological diversity and heritage,
- fulfillment of the educational function in the field of Earth Sciences (geoeducation),
- dissemination of knowledge to a broader audience that is not composed of specialists (science popularisation),
- engaging users in the process of learning, absorbing, and understanding newly introduced content,
- providing experiences, emotions, and new encounters connected with cognitive aspects (geological, geomorphological knowledge, etc.),
- dissemination and promotion of activities for the development of geotourism.

The finally produced geoeducational tool addresses strictly defined issues of sandy-gravelly debritic sedimentation, thereby undertaking the challenge of popularising Earth Sciences. The provision of the geointerpretative layer takes place both at the level of graphic visualisations and textual content, and the selection of the substantive level of transmission promotes knowledge dissemination among users outside the scientific branch. Geoeducation is conducted in the context of learning and understanding the sedimentary processes responsible for the formation of specific products – today present on the Earth's surface in the form of Carpathian sandstone-conglomeratic rocks, which are undoubtedly geotourism attractions.

The montage techniques applied in the tool, such as framing images from different angles, several-second freeze frames, or interweaving the film with graphic models, maintain user attention, make tracking the ongoing process more attractive, allow for a more thorough analysis of its significant stages, and confront the image of the forming product – sandy-gravelly debrite – with a graphical model of the apron depositional system tract.

The authors' ownership of intellectual property rights to the final product – the geoeducational tool – enabled the tool to be made available in the public space (YouTube). Open access to the tool creates the possibility of familiarising a wide audience with it.

The process of designing and producing the geoeducational tool in the form of film was based on clearly defined educational goals, a specific scope of geological knowledge (genesis of flysch deposits), the assumptions of process sedimentology, the use of simple laboratory methods, the application of geointerpretation methods, and the engagement of simple digital tools. The experience gained during the project implementation and reflection on the developed end result allowed for the definition of criteria characterising a correctly constructed and properly functioning this geoeducational tool (Tab. 3).

Table 3. The criteria for a properly designed and executed film-based geoeducational tool

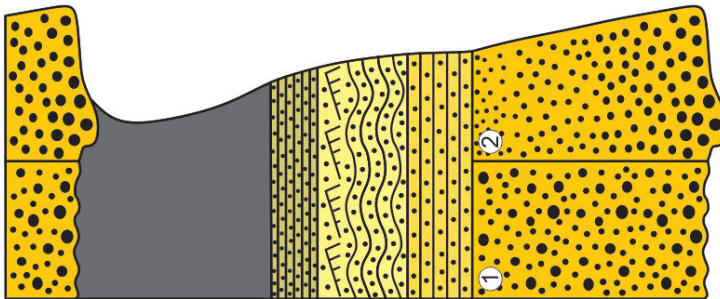
No.	Criterion	Importance for geoeducation
1.	Completeness	providing a complete sediment gravity flow process and its deposit development – provides a basis for understanding the: environmental nature, physical processes, sedimentary products, and depositional system
2.	Readability / Clarity	easy to observe and clearly visible throughout the entire event/process mechanism facilitates understanding of the educational message
3.	Naturalism	imitation and imitating reality make the demonstrated process, generated product and visualised content credible
4.	Realism	the factual consistency of the laboratory (experimental) model with field observations lends credence to the inferred genesis
5.	Repeatability	obtaining an identical result under the same conditions and with the same parameters of the system during subsequent trials makes the observed process or the postulated genesis of the product credible
6.	Spectacularity	creating a visual impression on the recipient and the associated positive emotions, solidifies the observations in memory
7.	Interactivity	the possibility of user intervention in the tool's operation (e.g. independent start-up, changing the operating speed, modifying the ongoing process according to understandable parameters), embedding the educational message in memory

7.2. PROCESS SEDIMENTOLOGY AND THE PARADIGM OF THE GENESIS OF SOME FLYSCH ROCKS

Studies of the subject literature have shown that the same sediment gravity flow processes and their deposits are described and interpreted in very differently manner [6–29]. Establishing the actual state is crucial for explaining the genesis of the rocky form deposits, and therefore also for the proposed geointerpretation applied in the geoeducational film tool.

For example, the so-called Bouma Sequence presented below (described by Bouma [10]), consisting of a strictly defined succession of lithological-sedimentological members (Ta–Te), i.e., an idealistic turbiditic model intended to represent the sedimentary product of a single turbidity current, has different explanations (Fig. 11) [15, 24, 29].

Further differentiation of turbidites, in the context of turbulent suspensions of turbidity currents, was made by Sanders [54]. Another classification of sediment gravity flows based on rheology was the work of Middleton and Hampton [12, 13]. However, in studies on deep-sea siliciclastic deposits, some researchers, such as Mutti *et al.* [44], postulate that the products of all sediment gravity flows should be classified collectively as turbidites (Fig. 12).



primary sedimentary structures	Bouma (1962) [10]	Lowe (1982) [15]	Shanmugam (2021) [24]	authors	
laminated to massive (homogeneous)	Te	pelagic and hemipelagic	pelagic and hemipelagic	pelagic and hemipelagic	
		Td	low-density turbidity current	bottom-current reworking	tractional bottom-current reworking
lower flat-parallel lamination	Tb				
massive (1) or normal graded (2)	Ta	high-density turbidity current	sandy debris flow	sandy debris flow if massive (1) or sandy turbidity flow if normally graded (2)	

Fig. 11. Different interpretations of the deep-sea depositional sequence model

Source: [24], changed

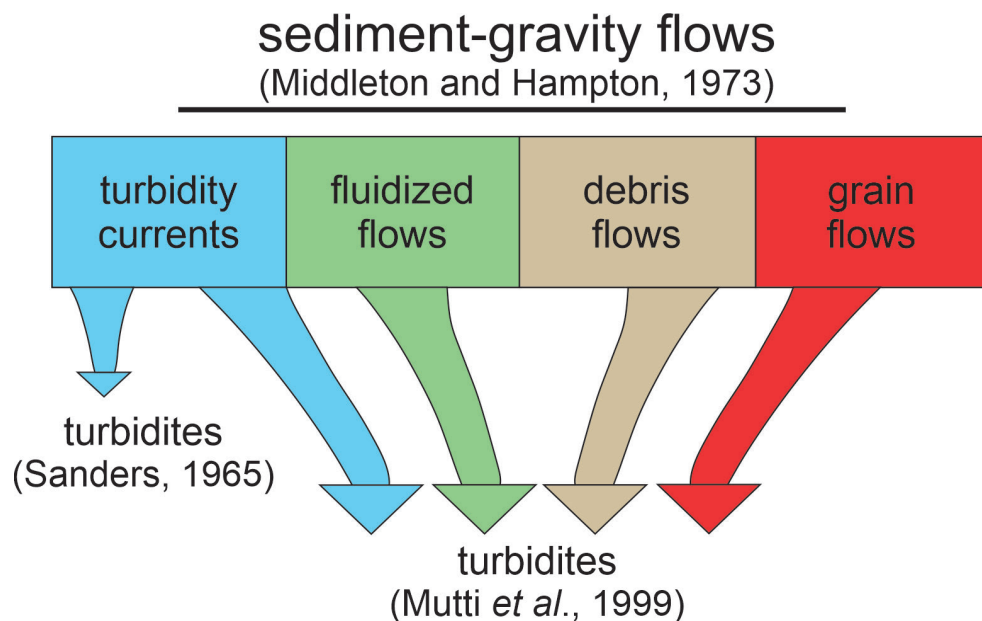


Fig. 12. Different interpretations of sediment gravity flow products

Source: [24], partially changed

Returning to history, Kuenen [6–8] and Kuenen and Migliorini [52], in addition to the so-called low-density turbidites (i.e., products of low-concentrated, turbulent sediment gravity-driven flows – normally graded turbidity flow deposits; within the meaning of this work), also described mass gravity events *sensu* Strzeboński [29], whose movement occurred in a plastic/laminar state (the main sustaining mechanism was not turbulence) – as so-called high-density turbidity currents (to distinguish them from ‘normal’ turbulent low-density turbidity currents). The concept of so-called high-density turbidity currents (i.e., sediment gravity flows with a high volumetric concentration) was subsequently developed by Lowe [15] (Figs. 3–5, 11).

In turn, Kuenen [8] and Dżułyński *et al.* [9], based on observations of flyschoidal deposits outcrops in the form of amalgamated beds consisting of two members with contrasting textural-structural features, proposed the term ‘fluxo-turbidites’ (‘fluxoturbidites’) for them. In the authors’ intent [8, 9], the lower part (i.e., ‘fluxo-’ member) was intended to correspond to a high-density turbidite, and the upper part (‘-turbidity’ member) represented low-density turbidite (‘normal’ turbidite, i.e., the normally graded product of a low-density turbidity current). The idea of fluxoturbidites was later analysed by Ślaczka and Thompson [14] and modified by Leszczyński [17]. In response to the ‘fluxoturbiditic’ considerations and controversies associated with them, Prof. Kenneth J. Hsü [18, 19] recalled a historical conversation with Prof. Stanisław Dżułyński, who stated that ‘fluxoturbidites’ are products of ‘sand avalanches’ – below a record of a scientific exchange of views, published in *Physics of Sedimentology*, 2004 (source: [19], p. 82).

I always had difficulty understanding this term. Why fluxo? Why turbidite? What is the difference between a fluxo- and an ordinary turbidite. It seems that this is another case when a geologist wanted to hide his ignorance behind an exotic name.

The term first appeared in an article published by Stan Dzulynski, a noted Polish sedimentologist, and his colleagues. When I visited Cracow in 1976, I asked Dzulynski to show me a fluxo-turbidite. He took me to the foothills of the Polish Carpathians to face the prototype of fluxoturbidite. It was a sandstone bed some 5 m thick, intercalated in a deep marine sedimentary sequence. Other sandstone beds of the sequence show graded bedding and other structures typical of deposition by turbidity currents; they are turbidites. The “fluxoturbidite” is relatively well sorted and show none of the turbidite features. There are faint laminations here and there, suggestive of resedimentation of a previously deposited sand.

I asked Dzulynski what was the mechanism of deposition of a “fluxoturbidite”. He answered:

“The sand came down a steep submarine slope like snow avalanches in your mountains.”

“Then why do you not call them sand avalanches?”

“Yes, we did, but then Kuenen came. He was an international expert, and we were just provincials. We wrote an article of our Polish work with joint authorship. Kuenen insisted that the term “sand avalanche deposit” is too long a name, with too many genetic connotations. Fluxoturbidite is shorter, and can always be considered a descriptive name if our interpretation is wrong.”

This is unfortunate, of course, because the expression “sand avalanche” tells everyone clearly the interpretation of the authors on the basis of their evidence; fluxoturbidite is just another new fancy word beloved by fuzzy thinkers in their pretence to be technical.

This directly implies that the mechanism of formation of both high-density turbidites (equivalent to the ‘fluxo-’ member) and the later introduced ‘fluxoturbidites’ (their massively developed sandstone, conglomeratic, or gravelly mudstone members) is not turbulence, but mass, laminar gravitational transport and deposition, in which granular material is mainly sustained by the force of the detrital matrix [21–25, 27–29]. This genesis is also evidenced by observations and results of conducted experimental modelling (comp. also: [27], p. 205; [37], p. 7).

An identical view was maintained by Unrug [11], also writing about sediment gravity flows of the ‘sand flows’ type, in reference to massive sandstone-conglomeratic flysch deposits of the Istebna Formation. In this context, massively developed deep-water siliciclastic and calcariclastic deposits *sensu* Strzeboński [28] should be called debrites, i.e., products of debris flows – cohesive (in the case of gravelly-mudstone debrites) and non-cohesive (sandstone-to-conglomeratic debrites, respectively) (see also: [21–25, 27–29]), which is postulated through the presented film-based geoeducational tool.

A characteristic feature of the structure of Carpathian residual rocky forms is precisely the presence of their deposits in the form of massive sandstone-conglomeratic lithofacies (rocks resistant to denudation factors – outcrops of inclined layers along which strike a plateau ridge was formed), occurring without regular interbeddings of mudstone/claystone shales (which is one of the basic conditions for the formation and preservation of these relic flysch tors) [32–37]. In connection with such lithological-sedimentological development, amalgamation, i.e., the phenomenon of combining individual beds into a composite bed *sensu*

Strzeboński [29], has become a common feature. Many such amalgamated composite beds form, on a larger scale, sometimes tens of meters of texturally-structurally ‘chaotical’ debrite complexes [27–29].

During the rapid deceleration of a non-cohesive debris flow and mass deposition of sandy-gravelly material (terminal phase of gravitational redeposition of a single episode), in the surface part of the apron tongue zone ending – a very short-lived (rapidly suppressed in less than 1 second) initiation of a turbulent state was observed. Turbulence involved a small (up to a few % of the flow volume) amount of the finest clasts – very fine-grained sand with an admixture of silt (without pelitic particles which were not in the sandy-gravelly flow material). The generated turbulent sandy turbidity flow, induced in this situation, clearly separated (detached) and deposited a normally-graded sandy turbidite with, beyond the front of the previously deposited massive sandy-gravelly debrite ([27] p. 205; [37], p. 7).

In connection with such genesis and development of the structural features of such type deposits – massive sandstone-to-conglomeratic flysch, during field outcrop logging, special attention should be paid to finding sedimentary erosion-depositional boundaries. If caution is not exercised (cursory logging), an amalgamated composite bed composed of individual beds with a massive structure can be mistakenly described as a single bed with normal grading (with the interpretive implication of a ‘turbidite’), when in reality, they are amalgamated massively developed debritic beds (Fig. 13).

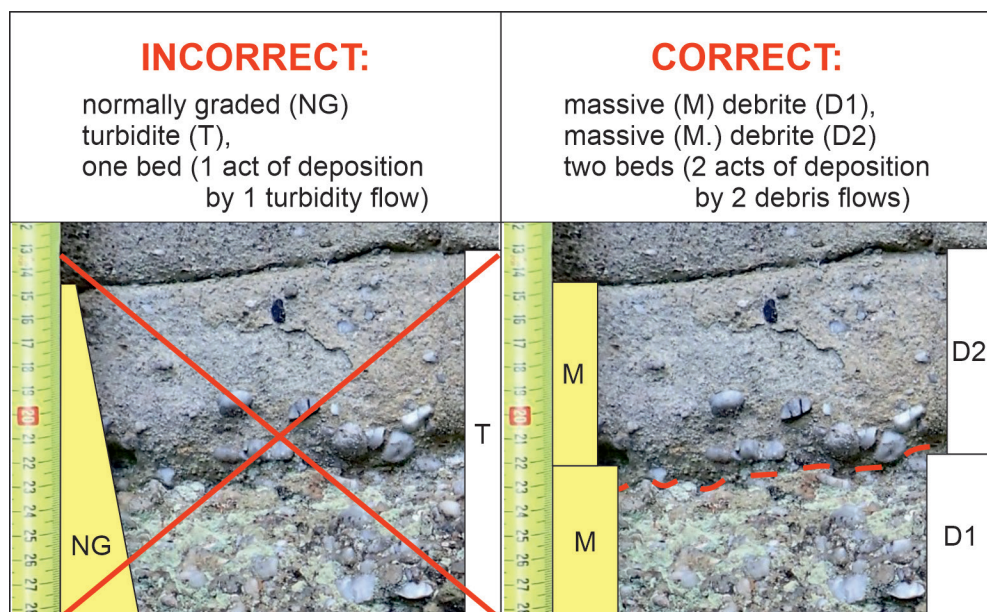


Fig. 13. Amalgamated beds within the Istebna Fm.

Source: [37], fig. 6H, p. 11, changed

8. CONCLUSIONS

The geoeducational tool, inspired by the geotouristic attractiveness of Carpathian sandstone-to-conglomeratic residual rocky forms, allowed for a discussion with the paradigm of turbiditic genesis one of the flysch-type deposits building the aforementioned relic flysch tors. Factual field studies, empirical laboratory simulations, and geointerpretative digital work allowed for the following conclusions:

1. Visualising the genesis of sandstone-conglomeratic debrites of the Carpathian flysch, based on the assumptions of process sedimentology ('from detail to general'), required conducting sedimentological modelling (flume experiments) generating sandy-gravelly (non-cohesive) debris flows.
2. Factual observations collected during field studies and repeatedly conducted experimental flume modelling allowed for documenting the genesis of sandy-gravelly deposits with a massive (disorganised) structure.
3. The documented physical sedimentary process responsible for the formation of experimental sandy-gravelly sediments with a massive structure (non-cohesive debrites) is a type of mass sediment gravity flow in which the clasts of a randomly scattered granular framework are supported by the detrital matrix strength and are transported in a laminar state – i.e., by sandy-gravelly (non-cohesive) debris flow.
4. Physical sedimentological modelling, conducted in the direction of searching for a process analogy for the genesis of massively developed sandstone-conglomeratic flysch deposits (non-cohesive debrites) building residual rocky forms of the Outer Carpathians (so-called Flysch Carpathians), can provide a basis for creating a geoeducational tool in the form of a film presenting and explaining their sedimentological nature.
5. Designing a geoeducational tool requires a significantly higher level of substantive preparation than the content later presented and explained to the audience.
6. Ensuring substantive correctness and high (visual) quality of the tool's components requires numerous repetitions and modifications based on the trial-and-error method, ultimately allowing for the achievement of the expected effect. This is very time-consuming, labor- and material-intensive.
7. The scope of geointerpretation of presented processes should be adapted to the audience defined at the beginning of the work.
8. The level of attractiveness can be increased by: adding a soundtrack, content read by a voice-over, different language versions, interactivity, etc.
9. The finished product can arouse the interest of geoeducation centers, museums, and can be exhibited at exhibitions related to Earth Sciences.
10. A film illustrating sandy-gravelly debris flows fits into the definition of a geoeducational tool as a geotourism product.
11. Experimental non-cohesive debrites (massive sandy-gravelly sediments) documented in the film are analogues for sandstone-conglomeratic debrites that constitute the building material for Carpathian residual rocky forms.

12. Such developed flysch lithofacies represent a sediment gravity flow developing in the form of a non-turbulent (laminar) debris flow resembling a subaqueous sandy-gravelly slope ‘avalanche’. The product of such a mass laminar gravity-driven flow should therefore be called a non-cohesive debrite or sandy-gravelly debrite and in relation to ancient (flysch) deposits – sandstone-to-conglomeratic debrite (debritic sandstone-to-conglomerates).
13. The authors are aware that the interpretation of results of fieldwork on selected Carpathian flysch objects (single geosites of massive sandstone-conglomerate debrites that build representative rocky forms and comparative outcrops of sandstone-mudstone flysch turbidites), as well as the geointerpretation of repeatable laboratory experiment results (experimental products), are approximate. Therefore, they cannot be directly applied into processes and their products occurring on the natural environment scale (source area, sedimentary basin, transport-depositional system tract). However, the clear similarity in the lithological-sedimentological characteristics of analogue flume experiment products to the observed factual textural-structural features in the rock record justifies undertaking this discussion and formulating the presented conclusions. It also encourages further studies in the experimental- and field sedimentology on a broader scale (areal and quantitative). Thus, despite the understandable methodological limitation (laboratory scale of modelling, limited number of analysed rocky forms), the proposed geointerpretation of laboratory modelling products can be successfully implemented in geoeducation for the popularisation of Earth Sciences and the promotion of geotourism.

Acknowledgments

The authors would like to thank the reviewers: Ms. Anna Świerczewska, Mr. Tadeusz Słomka and Mr. Artur Kędzior, for their valuable comments and constructive suggestions. Special thanks go to Mr. Screepat Jain for advice and assistance with English translations.

This study received financial support from the AGH University of Kraków – Research Subvention No. 16.16.140.315 and was conducted as a part of the activities of the Student Scientific Associations of the Faculty of Geology, Geophysics, and Environmental Protection of the AGH University of Krakow – the “Geotourism” and the “Azymut”.

REFERENCES

- [1] Ziarek Z., *Projektowanie narzędzia geoedukacyjnego dla potrzeb geoturystyki – studium przypadku sedymentologicznego modelowania prądu zawiesinowego*, [in:] 64. Barbórkowa Konferencja Studenckich Kół Naukowych Pionu Górniczego AGH, Kraków, 7 grudnia 2023, pp. 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
- [2] Ziarek Z.J., *Narzędzie geoedukacyjne na potrzeby geoturystyki – studium sedymentologicznego modelowania prądu zawiesinowego [Geoeducational tool for geotourism – a study of sedimentological modeling of turbidity current]*, [in:] Bogacz P. (red.), *Artykuły Laureatów 64. Barbórkowej Konferencji Studenckich Kół Naukowych AGH*, Wydawnictwa AGH, Kraków 2024, pp. 341–357, <https://doi.org/10.7494/978-83-67427-86-9>.

- [3] Ziarek Z.J., *Designing geoeducational tools for geotourism needs – a case of study of the Outer Flysch Carpathians*, 24th International Multidisciplinary Scientific Geoconference SGEM2024, vol. 24(1.1), pp. 45–52, <https://doi.org/10.5593/sgem2024/1.1/s01.06>.
- [4] Ziarek Z.J., *Film obrazujący piaskowo-żwirowe spływy rumoszowe jako narzędzie geoedukacyjne dla potrzeb geoturystyki* [A film showing sandy-gravelly debris flows as a geoeducational tool for the needs of geotourism], [in:] 65. Barbórkowa Konferencja Studenckich Kół Naukowych Pionu Górniczego AGH, 12–13 grudnia 2024, Kraków, pp. 24–25 [materiały konferencyjne], https://www.researchgate.net/publication/386874711_A_film_showing_sandy-gravelly_debris_flows_as_a_geoeducational_tool_for_the_needs_of_geotourism_Film_obrazujacy_piaskowo-żwirowe_splywy_rumoszowe_jako_narzedzie_geoedukacyjne_dla_potrzeb_geoturystyki
- [5] Ziarek Z.J., *Film obrazujący piaskowo-żwirowe spływy rumoszowe jako narzędzie geoedukacyjne dla potrzeb geoturystyki* [A film showing sandy-gravelly debris flows as a geoeducational tool for the needs of geotourism], 2024 [presentation], <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.32247.12960>.
- [6] Kuenen P.H., *Turbidity currents of high density*, [in:] Harland W.B., Jones O.T. (eds.), *The Geology of Sea and Ocean Floors: Part 8, Proceedings of Section G, Report of the Eighteenth Session*, International Geological Congress, London 1950 [for 1948], pp. 44–52.
- [7] Kuenen P.H., *Properties of turbidity currents of high density*, [in:] Hough J.L. (ed.), *Turbidity currents and the transportation of coarse sediments to deep water*, SEPM, Special Publication, 2, 1951, pp. 14–33.
- [8] Kuenen P.H., *Problems concerning source and transportation of flysch sediments*, *Geologie en Mijnbouw*, vol. 20(10), 1958, pp. 329–339.
- [9] Dżułyński S., Książkiewicz M., Kuenen Ph.H., *Turbidites in flysch of the Polish Carpathian Mountains*, *Bulletin of the Geological Society of America*, vol. 70(8), 1959, pp. 1089–1118, [https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1959\)70\[1089:TIFOTP\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1959)70[1089:TIFOTP]2.0.CO;2).
- [10] Bouma A.H., *Sedimentology of Some Flysch Deposits: A Graphic Approach to Facies Interpretation*, Elsevier Publishing Company, Amsterdam – New York 1962.
- [11] Unrug R., *Istebna Beds – a fluxoturbidity formation in the Carpathian Flysch*, *Annales de la Société Géologique de Pologne*, vol. 33(1), 1963, pp. 49–92.
- [12] Middleton G.V., Hampton M.A., *Sediment gravity flows: Mechanics of flow and deposition. Part I*, [in:] Middleton G.V., Bouma A.H. (eds.), *Turbidites and Deep-Water Sedimentation*. SEPM, Pacific Section, Anaheim 1973, pp. 1–38.
- [13] Middleton G.V., Hampton M.A., *Subaqueous sediment transport and deposition by sediment gravity flows*, [in:] Stanley D.J., Swift D.J.P. (eds.), *Marine Sediment Transport and Environmental Management*, Wiley, New York 1976, pp. 197–218.
- [14] Ślącza A., Thompson III S., *A revision of the fluxoturbidite concept based on type examples in the Polish Carpathian Flysch*, *Annales Societatis Geologorum Poloniae*, vol. 51(1–2), 1981, pp. 3–44.
- [15] Lowe D.R., *Sediment gravity flows: 2. Depositional models with special reference to the deposits of high-density turbidity currents*, *Journal of Sedimentary Petrology*, vol. 52(1), 1982, pp. 279–298, <https://doi.org/10.1306/212F7F31-2B24-11D7-8648000102C1865D>.

- [16] Postma G., Nemec W., Kleinspehn K.L., *Large floating clasts in turbidites: a mechanism for their emplacement*, *Sedimentary Geology*, vol. 58(1), 1988, pp. 47–61, [https://doi.org/10.1016/0037-0738\(88\)90005-X](https://doi.org/10.1016/0037-0738(88)90005-X).
- [17] Leszczyński S., *Characteristics and origin of fluxoturbidites from the Carpathian Flysch (Cretaceous – Palaeogene), South Poland*, *Annales Societatis Geologorum Poloniae*, vol. 59(3–4), 1989, pp. 351–390, http://www.asgp.pl/sites/default/files/volumes/59_3-4_351_390.pdf [access: 2.06.2025].
- [18] Hsü K.J., *Physical Principles of Sedimentology*, Springer-Verlag, New York 1989, <https://doi.org/10.1007/978-3-662-02584-0>.
- [19] Hsü K.J., *Physics of Sedimentology*, Second Edition, Springer, Berlin 2004.
- [20] Słomka T., *Głębokomorska sedymentacja silikoklastyczna warstw godulskich Karpat*, *Prace Geologiczne – Polska Akademia Nauk. Oddział w Krakowie*, 139, Wydawnictwo Polskiej Akademii Nauk, Kraków 1995.
- [21] Shanmugam G., *High-density turbidity currents: Are they sandy debris flows? Perspectives*, *Journal of Sedimentary Research*, vol. 66(1), 1996, pp. 2–10, <https://doi.org/10.1306/D426828E-2B26-11D7-8648000102C1865D>.
- [22] Shanmugam G., *50 years of the turbidite paradigm (1950s–1990s): deep-water processes and facies models – a critical perspective*, *Marine and Petroleum Geology*, vol. 17(2), 2000, pp. 285–342, [https://doi.org/10.1016/S0264-8172\(99\)00011-2](https://doi.org/10.1016/S0264-8172(99)00011-2).
- [23] Shanmugam G., *Deep-water Processes and Facies Models: Implications for Sandstone Petroleum Reservoirs. Handbook of Petroleum Exploration and Production 5*, Elsevier, Amsterdam 2006.
- [24] Shanmugam G., *Mass Transport, Gravity Flows, and Bottom Currents. Downslope and Alongslope Processes and Deposits*, Elsevier, Amsterdam 2021.
- [25] Shanmugam G., *150 Years (1872–2022) of research on deep-water processes, deposits, settings, triggers, and deformation: A difficult domain of progress, dichotomy, diversion, omission, and groupthink*, *Journal of Palaeogeography*, vol. 11(4), 2022, pp. 469–564, <https://doi.org/10.1016/j.jop.2022.08.004>.
- [26] Talling P.J., Masson D.G., Sumner E.J., Malgesini G., *Subaqueous sediment density flows: depositional processes and deposit types*, *Sedimentology*, vol. 59(7), 2012, pp. 1937–2003, <https://doi.org/10.1111/j.1365-3091.2012.01353.x>.
- [27] Strzeboński P., *Late Cretaceous – Early Paleogene sandy-to-gravelly debris flows and their sediments in the Silesian Basin of the Alpine Tethys (Western Outer Carpathians, Istebna Formation)*, *Geological Quarterly*, vol. 59(1), 2015, pp. 195–214, https://gq.pgi.gov.pl/article/view/10660/pdf_1176 [access: 2.06.2025].
- [28] Strzeboński P., Kowal-Kasprzyk J., Olszewska B., *Exotic clasts, debris flow deposits and their significance for reconstruction of the Istebna Formation (Late Cretaceous–Paleocene, Silesian Basin, Outer Carpathians)*, *Geologica Carpathica*, vol. 68(6), 2017, pp. 562–582, <https://doi.org/10.1515/geoca-2017-0037>.
- [29] 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(2), 2022, pp. 159–180, <https://doi.org/10.14241/asgp.2022.04>.

- [30] Łapcik P., *Sedimentary processes and architecture of Upper Cretaceous deep-sea channel deposits: a case from the Skole Nappe, Polish Outer Carpathians*, *Geologica Carpathica*, vol. 69(1), 2018, pp. 71–88, <https://www.doi.org/10.1515/geoca-2018-0005>.
- [31] Łapcik P., *Facies anatomy of a progradational submarine channelized lobe complex: semi-quantitative analysis of the Ropianka Formation (Campanian – Paleocene) in Hucisko Jawornickie section, Skole Nappe, Polish Carpathians*, *Acta Geologica Polonica*, vol. 69(1), 2019, pp. 111–141, <https://doi.org/10.1515/agp-2018-0026>.
- [32] Ziarek Z., *Kamienie Brodzińskiego jako atrakcja geoturystyczna gminy Lipnica Murowana (The Brodziński's Stones as a geotouristic attraction of Lipnica Murowana municipality)*, [in:] Bogacz P. (red.), *Artykuły Laureatów 63. Barbórkowej Konferencji Studenckich Kół Naukowych AGH*, Wydawnictwa AGH, Kraków 2023, pp. 239–248, <https://repo.agh.edu.pl/entities/publication/d81969de-bca9-48ef-a3c4-388dcfdb806>.
- [33] 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.
- [34] Alexandrowicz W.P., Alexandrowicz Z., 2022. *Geosites in tourist areas: the best method for the promotion of geotourism and geoheritage (an example from the Polish Flysch Carpathians)*, *Geoheritage*, vol. 14(2), 45, 2022, <https://doi.org/10.1007/s12371-022-00655-2>.
- [35] Strzeboński P., *Piaskowcowo-zlepieńcowe formy skałkowe – więcej niż atrakcja turystyczna*, *Geoturystyka/Geotourism*, nr 1–2(16–17), 2009, pp. 49–60.
- [36] Strzeboński P., *Kamienie Brodzińskiego. The Brodziński's Stones*, [in:] Słomka T. (red. nauk.), *Katalog obiektów geoturystycznych w obrębie pomników i rezerwatów przyrody nieożywionej. The catalogue of geotourist sites in nature reserves and monuments*, Akademia Górniczo-Hutnicza, Kraków 2013, pp. 290–292.
- [37] Strzeboński P., *Residual rocky forms in the landscape of the Outer Carpathians (Silesian Beskid Mts, Poland) – geotourist and sedimentological case study*, *Geotourism/ Geoturystyka*, no. (1–2)(64–65), 2023, pp. 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).
- [38] Słomka T., Kicińska-Świdarska A., *Geoturystyka – podstawowe pojęcia*, *Geoturystyka*, nr 1(1), 2004, pp. 5–7.
- [39] Migoń P., *Geoturystyka*, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 2012.
- [40] Słomka T. (red. nauk.), *Katalog obiektów geoturystycznych w obrębie pomników i rezerwatów przyrody nieożywionej. The catalogue of geotourist sites in nature reserves and monuments*, Akademia Górniczo-Hutnicza, Kraków 2013.
- [41] Starzec K., Waśkowska A., Golonka J., Gawęda A., Szopa K., *Rocky Sandstone Landforms in Istebna, Silesian Beskid (Outer Carpathians, Poland)*, *Geotourism/Geoturystyka*, no. 1–2(52–53), 2018, pp. 13–26, <https://doi.org/10.7494/geotour.2018.52-53.2>.
- [42] Welc E.M., Miśkiewicz K., *Geoturystyka i geoedukacja w rezerwacie przyrody nieożywionej „Prządk” im. prof. Henryka Świdzińskiego*, *Geotourism/Geoturystyka*, no. 1–2(56–57), 2019, pp. 11–42, <https://doi.org/10.7494/geotour.2019.56-57.2>.
- [43] Welc E., Miśkiewicz K., *The concept of the geotourism potential and its practical application: a case study of the Prządk (the Spinners) Nature Reserve in the Carpathians, Poland*, *Resources*, vol. 9(12), 2020, 145, <https://doi.org/10.3390/resources9120145/>.

- [44] Mutti E., Tinterri R., Remacha E., Mavilla N., Angella S., Fava L., *An Introduction to the Analysis of Ancient Turbidite Basins From an Outcrop Perspective*, American Association of Petroleum Geologists Continuing Education Course, Note Series, No. 39, 1999, <https://doi.org/10.1306/CE39687>.
- [45] Poprawa P., Malata T., Oszczytko N., *Ewolucja tektoniczna basenów sedymentacyjnych polskiej części Karpat zewnętrznych w świetle analizy subsydencji* [*Tectonic evolution of the Polish part of Outer Carpathian's sedimentary basins constraints from subsidence analysis*, Przegląd Geologiczny, vol. 50(11), 2002, pp. 1092–1108.
- [46] Jankowski L., *Rola kompleksów chaotycznych w procesie formowania górotworu Karpat – ujęcie dyskusyjne*, Instytut Nafty i Gazu – Państwowy Instytut Badawczy, „Prace Naukowe Instytutu Nafty i Gazu – Państwowego Instytutu Badawczego”, nr 202, 2015.
- [47] 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.
- [48] Strzeboński P., *Debryty kohezyjne warstw istebniańskich (senon górny–paleocen) na zachód od Skawy*, Geologia, 31(2), 2005, pp. 201–224, https://journals.bg.agh.edu.pl/GEOLOGIA/2005-02/Geologia_2005_2_04.pdf.
- [49] 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(6), 2023, pp. 1741–1784, <https://www.doi.org/10.1111/sed.13095>.
- [50] Reading H.G., Richards M., *Turbidite systems in deep-water basin margins classified by grain size and feeder system*, AAPG Bulletin, 78(5), 1994, pp. 792–822, <https://doi.org/10.1306/A25FE3BF-171B-11D7-8645000102C1865D>.
- [51] Gradziński R., Kostecka A., Radomski A., Unrug R., *Zarys sedymentologii*, Wydawnictwa Geologiczne, Warszawa 1986.
- [52] Kuenen P.H., Migliorini C.I., *Turbidity currents as a case of graded bedding*, The Journal of Geology, 58(2), 1950, pp. 91–127, <https://doi.org/10.1086/625710>.
- [53] Dżułyński S., Smith A.J., *Fliśz jako facja [Flysch facies]*, Rocznik Polskiego Towarzystwa Geologicznego, 34(1–2), 1964, pp. 245–266.
- [54] Sanders J.E., *Primary sedimentary structures formed by turbidity currents and related resedimentation mechanisms*, [in:] Middleton G.V. (ed.), *Primary Sedimentary Structures and Their Hydrodynamic Interpretation*. SEPM, Special Publication, 12, Tulsa, Oklahoma 1965, pp. 192–219.
- [55] Miśkiewicz K., *Produkt geoturystyczny jako narzędzie geoedukacyjne i metoda promocji dziedzictwa geologicznego Polski*, Przegląd Geologiczny, 71(6), 2023, pp. 314–320, https://yadda.icm.edu.pl/baztech/element/bwmeta1.element.baztech-0031cf67-f995-44ff-9d81-cc3bbd9c51a2/c/Miskiewicz_K_Produkt_P_Geol_Vol_71_nr_6_2023.pdf.
- [56] Rodrigues J., Neto De Carvalho C., Ramos M., Ramos R., Vinagre A., Vinagre H., *Geoproductions – Innovative development strategies in UNESCO Geoparks: Concept, implementation methodology, and case studies from Naturtejo Global Geopark, Portugal*, International Journal of Geoheritage and Parks, 9(1), 2020, pp. 108–128, <https://doi.org/10.1016/j.ijgeop.2020.12.003>.

STRESZCZENIE

Bazując na doświadczeniu wcześniej przeprowadzonych modelowań turbidytowych spływów grawitacyjnych (*sensu* prądów zawieszinowych) oraz satysfakcjonujących wynikach geoedukacyjnych ich wizualnej prezentacji (dokumentacja powstawania turbulentnych suspensji, ich transportu i sedymentacji oraz formowania systemu depozycyjnego) [1–3], podjęto próbę eksperymentalnego odtworzenia innego rodzaju spływu grawitacyjnego osadu – piaskowo-żwirowego spływu rumoszewego [4, 5]. Charakterystyczną cechą produktów drugiego rodzaju spływu – debrytów piaskowcowych do zlepieńcowych – jest przede wszystkim ich masywna struktura (tj. bezładne rozproszenie klastów szkieletu ziarnowego w detrytycznym matriks) [4–32]. Tak wykształcone utwory debrytowe powszechnie budują karpackie ostańcowe formy skałkowe [32–37], które z powodzeniem można wykorzystać w popularyzowaniu nauk przyrodniczych o Ziemi, prowadząc geoedukację [32–43].

Dodatkową motywacją podjętych badań były również istniejące w sedymentologii rozbieżności interpretacyjne dotyczące pochodzenia masywnych utworów reprezentujących odmianę gruboklastycznego, gruboławicowego i amalgamowanego fliszu (Fig. 1, 2, 14) [4–32]. Upowszechniony w sedymentologicznych badaniach nad utworami grawitacyjnych spływów osadu paradygmat, wskazujący na turbidytową genezę wyżej wzmiankowanych masywnie wykształconych litofacji silikoklastycznych budujących przedmiotowe skałki, a także publikacje prezentujące poglądy na temat możliwości innego niż turbidytowe pochodzenia takich masywnych silikoklastyków fliszowych, zachęciły autorów do przeprowadzenia laboratoryjnego modelowania korytowego umożliwiającego udokumentowanie fizycznego procesu sedymentacyjnego, odpowiedzialnego za powstawanie masywnych piaskowo-żwirowych osadów i uformowanie charakterystycznego dla nich typu systemu transportowo-depozycyjnego.

Tworzenie narzędzia geoedukacyjnego obejmowało: (a) etap projektowy – ustalenie przedmiotu, celu, metod i odbiorcy oraz wybór zagadnień i elementów, które będą prezentowane; (b) etap merytoryczny – przegląd wiedzy z zakresu sedymentologii głębokowodnych (pozaszelfowych) utworów silikoklastycznych i metod geoedukacyjnych; (c) etap laboratoryjny – zaprojektowanie modelowania sedymentologicznego, testowanie modelu analogowego, wprowadzanie poprawek; (d) etap produkcji – nagranie filmów z trzech ujęć, opracowanie treści geointerpretacyjnych i końcowy montaż narzędzia.

Eksperymentalne badania sedymentologiczne oparto na założeniach sedymentologii procesowej [1–5, 21–25, 29, 37], której metodyka postępowania prowadzona jest w wariancie „od szczegółu do ogółu”, czyli od opisowej charakterystyki wykształcenia produktu (cechy teksturalno-strukturalne skały) do krytycznego procesu odpowiedzialnego za jego powstanie. Wynikiem badań projektowych i laboratoryjnych eksperymentów było stworzenie interaktywnego narzędzia geoedukacyjnego (filmu wraz z geointerpretacją), które umożliwiło kompleksowe wyjaśnienie kontrowersyjnej interpretacji (różne poglądy genetyczne) natury sedymentologicznej gruboklastycznych masywnie rozwiniętych utworów. Projekt narzędzia filmowego na potrzeby geoturystyki oparto na idei geoedukacji, czyli popularyzacji wiedzy geologicznej poprzez poznawanie obiektów przyrody nieożywionej i/lub procesów odpowiedzialnych za ich genezę, uznawanych za turystycznie atrakcyjne [1–5, 32–43]. Takie narzędzie geoedukacyjne spełnia funkcję produktu geoturystycznego [55, 56].

Piaskowcowe do zlepieńcowych utwory debrytowe reprezentują jedną z odmian fliszu karpackiego (Fig. 2) [9, 11, 14, 17, 20, 27–29, 32–37, 40–43, 45–48]. Sedymentacja fliszowa w subbasenach zewnętrzno-karpackich (marginalnym fragmencie oceanu Tetyda) przebiegała w czasie w zmieniających się warunkach geotektonicznych i środowiskowych oraz z udziałem różnych procesów sedymentacyjnych, a także w różnej odległości od obszarów alimentacyjnych (źródłowych), z których dostarczany był zróżnicowany materiał terygeniczny, w tym niekiedy w postaci egzotyków (rozpoznawalnych makroskopowo ponadwymiarowych klastów skał krystalicznych i starszych skał osadowych) [9, 11, 14, 17, 20, 27–29, 32–37, 40–43, 45–48, 52–54]. Za transport i depozycję materiału osadów fliszowych w głównej mierze odpowiedzialne były subakwalne spływy (Fig. 3), czyli procesy transportu i depozycji niekoherentnej (rozdrobnionej) mieszaniny materiału klastycznego i płynów (cieczy i gazów) interstycjalnych (międzyziarnowych / porowych) o różnej koncentracji objętościowej, odbywające się pod wpływem grawitacji (spływy grawitacyjne osadu) [por. 12–31, 35–37, 44–51]. Ich przykładami są m.in. turbulentne spływy zawieszinowe, generujące produkt w postaci uziarnionych frakcjonalnie normalnie turbidytów, a także laminarne spływy rumoszowe wraz z ich produktem – masywnie wykształconymi debrytami (Fig. 3–7).

Piaskowo-żwirowy (niekohezyjny) głębokowodny spływ rumoszowy to jeden z typów procesów spływów grawitacyjnych osadu, w którym redeponowany materiał ziarnowy wraz z wodą zawartą w przestrzeni porowej (przy koncentracji objętościowej powyżej 25% [24]) transportowany jest *en masse* w dół skłonu basenowego w stanie laminarnym (w przeciwieństwie do turbulentnych zawieszin spływów turbidytowych) (Fig. 3–5, 7). W warunkach wysokiej koncentracji objętościowej masowego spływu niekohezyjnego (piaskowo-żwirowego) mechanizmem podtrzymującym przemieszczanie i utrzymywanie w zawieszeniu klastów żwirowych, w tym ponadwymiarowych (stanowiących fazę rozproszoną), jest głównie siła matriks piaskowego odgrywającego rolę fazy rozpraszającej. Wysokoskoncentrowana i wysokoenergetyczna mieszanina piaskowo-żwirowego osadu i wody, mająca efektywną siłę erozyjną (inkorporacja starszych osadów), przemieszczająca się grawitacyjnie po skłonie basenu sedymentacyjnego, a następnie ulegająca gwałtownemu wyhamowaniu i masowej depozycji, przypomina lawinę i jej „zamrożone” koluwium. Produktem spływu grawitacyjnego piaskowo-żwirowego rumoszu (masowego, niekohezyjnego spływu rumoszowego) jest debryt piaskowcowo-zlepieńcowy. Utwory tego typu charakteryzują się, w związku z takim przebiegiem rozwoju procesu sedymentacyjnego, strukturą masywną (brak możliwości stopniowej segregacji grawitacyjnej skoncentrowanego materiału okruczowego podtrzymywanego siłą matriks w trakcie transportu i gwałtownej masowej depozycji). To właśnie tego typu gruboklastyczne, masywne, nieregularnie uławiczone i amalgamowane piaskowcowo-zlepieńcowe utwory fliszowe (debryty niekohezyjne) [4, 5, 23–25, 27–29, 32] stanowią podstawowy materiał budulcowy ostańcowych form skałkowych, cieszących się w ostatnich latach nieustającym, a nawet rosnącym zainteresowaniem geoturystycznym [32, 35–37]. Oprócz scharakteryzowanych powyżej odmian produktów spływów grawitacyjnych osadu, wśród karpackich utworów fliszowych występują także masywne debryty mułowcowo-żwirowe (debryty kohezyjne – utwory mułowo-żwirowych spływów rumoszowych) [12, 13, 20, 23, 24, 26, 28–31, 46–48, 50, 51] (Fig. 3, 5), jednak ze względu na ich stosunkowo niską odporność na czynniki denudacji spowodowaną dużą zawartością spoiwa mułowego (mniej odpornego na wietrzenie i erozję) nie są one skałkotwórcze.

W warunkach naturalnych masywne piaszkowe do żwirowych osady debrytowe deponowane były głównie w głębokowodnej strefie basenu sedymentacyjnego (*sensu* poza krawędzią szelfu, gdzie mogły się rozwinąć ruchy masowe i spływy grawitacyjne), obejmującej skłon i jego podnóże. Tworzyły tam one indywidualne jezory klastyczne, które ulegały lateralnej i wertykalnej amalgamacji („sklejaniu” się), czyli litosomy pokrywowe przypominające „fartuszki”. Nakładające się i ulegające koalescencji (łączeniu się) piedmontowe pokrywy fartuchowe formowały liniowo zasilany fartuchowy system depozycji fliszowej (Fig. 7) [4, 5, 20, 27–29, 32, 35–37, 50].

W przeciwieństwie do karpackich debrytów uformowanych w systemie skłonowych pokryw fartuchowych głębokowodne turbidyty fliszowe stanowią podstawowy budulec transportowo-depozycyjnego systemu głębokomorskiego stożka (Fig. 8) (por. [29]). W celu wykazania odmienności ich natury sedymentologicznej można posłużyć się obrazowymi porównaniami. Przykładowo model punktowo zasilanego systemu stożka głębokomorskiego (Fig. 8a) można by w dużym przybliżeniu porównać wizualnie do ministożka napływowego uformowanego w czasie opadów deszczu (Fig. 8c). Podobnie model liniowo zasilanego systemu fartucha głębokomorskiego (Fig. 8b) jest morfologicznie porównywalny do piaskowo-żwirowego nasypu z placu budowy (Fig. 8d). Z kolei spływ rumoszowy można porównać do komunikacji zbiorowej (np. autobusu), w której pasażerowie podczas podróży są ścisczeni (ściśnięci) w wyniku przepełnienia środka transportu, a spływ turbidytowy do transportu indywidualnego (np. samochodu osobowego), zapewniającego pasażerom komfortową (swobodną) podróż w warunkach wzajemnego oddalenia (Fig. 9) (por. [24], fig. 2.30, s. 47).

Projekt narzędzia geoedukacyjnego został oparty na konkretnych wytycznych: narzędzie przeznaczone jest do udostępnienia publicznego, ma prezentować ściśle określony temat geoedukacyjny, zakres prezentowanej wiedzy ma być wyczerpujący i klarowny, zaś sposób jej prezentacji ma być zrozumiały i dostosowany do poziomu wiedzy ucznia szkoły średniej lub wyższej. Do osiągnięcia zamierzonego celu, zarówno na etapie projektowania narzędzia, jak i jego produkcji, zidentyfikowano problemy badawcze (Tab. 1), dla których rozwiązania zostały wypracowane i wdrożone na różnych etapach realizacji projektu. Na etapie obróbki cyfrowej narzędzia geoedukacyjnego (materiał filmowy) zadbano o wzmocnienie efektów wizualnych: obraz z trzech ujęć zmontowano w spójną chronologicznie wizualizację procesu laminarnego spływu rumoszowego, fragment ekranu wydzielono na plansze z treściami objaśniającymi oraz wprowadzono stopklatki z niezbędnymi dodatkowymi wyjaśnieniami kolejno pojawiających się zdarzeń. Geointerpretacja obserwowanych zjawisk, dostosowana do poziomu wiedzy zdefiniowanego odbiorcy, obejmuje dwie kategorie – elementy opisu środowiska oraz etapy genezy spływu rumoszowego (Tab. 2) (Fig. 10). Tak zaprojektowane filmowe narzędzie spełnia funkcję geoedukacyjną dzięki prezentacji odbiorcy sekwencji określonych treści, a możliwość zatrzymania lub przewinięcia filmu w dowolnym momencie ułatwia przyswojenie i utrwalenie wiedzy. Narzędzie udostępniane jest publicznie jako film na platformie YouTube (https://youtu.be/VKzgJUgh6_s). Obserwacje generowanych w warunkach laboratoryjnych masowych spływów grawitacyjnych osadu o charakterze liniowo zasilanych subakwalnych „lawin” piaskowo-żwirowych wykazały, że przedmiotowe utwory (masywne piaskowo-żwirowe debryty) powstają z laminarnych spływów rumoszowych przybierających formę jezorów formujących pokrywy klastyczne w systemie fartuchowym, a nie ze spływów turbidytowych (*sensu* turbulentnych suspensji prądów zawieszinowych) rozprzestrzeniających

się wachlarzowo i akumulowanych w formie lobów w systemie punktowo zasilanego podmorskiego stożka. W tej sytuacji masywnie wykształcone produkty procesów laminarnej redepozycji grawitacyjnej rumoszu piaszkowo-żwirowego powinny być określane mianem debrytów (debrytów niekohezyjnych), a nie turbidytów (Fig. 11, 12) czy fluksoturbidytów (Fig. 13).

Autorzy zdają sobie sprawę, że interpretacja wyników badań terenowych wybranych obiektów fliszu karpackiego (pojedyncze geostanowiska masywnych piaszkowcowo-zlepieńcowych debrytów budujących reprezentatywne formy skałkowe i porównawcze odsłonięcia piaszkowcowo-mułowcowych turbidytów fliszowych) oraz geointerpretacja powtarzalnych rezultatów doświadczeń laboratoryjnych (produkty eksperymentalne) mają charakter przybliżony. W związku z tym nie mogą być one wprost przekładane na procesy i ich produkty występujące w skali środowiska przyrodniczego (naturalny obszar źródłowy, basen sedimentacyjny, system transportowo-depozycyjny). Jednakże wyraźne podobieństwo cech wykształcenia litologiczno-sedymentologicznego produktów analogowych eksperymentów korytowych do obserwowanych faktograficznych cech teksturalno-strukturalnych zapisu skalnego uprawnia do podjęcia przedmiotowej dyskusji i sformułowania przedstawionych wniosków. Zachęca także do prowadzenia dalszych studiów w ramach sedimentologii eksperymentalnej oraz terenowej w szerszym zakresie (obszarowym i ilościowym). Zatem mimo zrozumiałego ograniczenia metodycznego (skala laboratoryjna modelowań, ograniczona liczba analizowanych obiektów skałkowych) proponowana geointerpretacja produktów modelowań laboratoryjnych może być z powodzeniem wykorzystana w geoedukacji realizowanej na potrzeby popularyzacji nauk o Ziemi oraz promocji geoturystyki.



ISBN 978-83-68219-43-2
ISSN 3071-7019