



POLITECHNIKA
LUBELSKA



POLITECHNIKA
RZESZOWSKA
im. IGNACEGO ŁUKASIEWICZA



POLITECHNICZNA SIEĆ
VIA CARPATIA

SZÓSTA KONFERENCJA KÓŁ NAUKOWYCH W RAMACH POLITECHNICZNEJ SIECI VIA CARPATIA

im. Prezydenta RP Lecha Kaczyńskiego

redakcja naukowa:

KATARZYNA KALINOWSKA-WICHROWSKA

JAROSŁAW SZUSTA

KAROLINA GABRYSIK

ŁUKASZ DRAGUN

TOMASZ PAWŁOWICZ

**SZÓSTA KONFERENCJA KÓŁ NAUKOWYCH
W RAMACH POLITECHNICZNEJ SIECI
VIA CARPATIA
IM. PREZYDENTA RP LECHA KACZYŃSKIEGO**

redakcja naukowa:

Katarzyna Kalinowska-Wichrowska, Jarosław Szusta,
Karolina Gabrysiak, Łukasz Dragun, Tomasz Pawłowicz



Politechnika
Białostocka

OFICyna WYDAWNICZA POLITECHNIKI BIAŁOSTOCKIEJ
BIAŁYSTOK 2025

Recenzenci:
dr Jacek Woźniak
dr Roman Tylżanowski

Korekta językowa:
Edyta Chrzanowska

Skład, grafika i okładka:
Marcin Dominów

© Copyright by Politechnika Białostocka, Białystok 2025

ISBN 978-83-68077-89-6 (e-Book)
DOI: 10.24427/978-83-68077-89-6



Opracowanie publikacji jest finansowane z projektu
„Politechniczna Sieć VIA CARPATIA im. Prezydenta RP Lecha Kaczyńskiego”
Działanie 4. Szkoła twórczego działania.



Publikacja jest udostępniona na licencji
Creative Commons Uznanie autorstwa-Użycie niekomercyjne-Bez utworów zależnych 4.0
(CC BY-NC-ND 4.0).

Pełną treść licencji udostępniono na stronie
creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/legalcode.pl.
Publikacja jest dostępna w Internecie na stronie Oficyny Wydawniczej PB.

Oficina Wydawnicza Politechniki Białostockiej
ul. Wiejska 45C, 15-351 Białystok
e-mail: oficina.wydawnicza@pb.edu.pl
www.pb.edu.pl

Spis treści

Wstęp	5
Wykorzystanie wirtualnych miast w wodociągach <i>Weronika Małek, Michał Zieliński, Paweł Suchorab</i>	7
Innowacyjne wykorzystanie kory wierzby oraz dębu wzbogaconych grafenem do usuwania jonów metali ciężkich z roztworów wodnych <i>Grzegorz Sawicki, Maciej Gil, Jakub Łapicz, Łukasz Kozicki, Ewelina Gołębiewska, Grzegorz Świderski</i>	15
Budowa platformy jeżdżącej z aktywnym zawieszeniem na kołach mecanum <i>Adrian Kosior, Michał Kumiega, Jakub Niemczycki</i>	26
Zwiększenie funkcjonalności robota współpracującego z wykorzystaniem metod wizyjnych i metod sterowania głosowego <i>Szymon Kotwica, Andrzej Chmielowiec, Karol Łysiak</i>	35
Identyfikacja termomechaniczna i strukturalna biokompozytu na bazie PLA w efekcie starzenia abiotycznego <i>Joanna Tomasiak, Miłosz Wrotniak, Stanisław Perestaj, Aneta Tor-Świątek</i>	42
Wpływ wysokości warstwy na jakość druku 3D dla wybranych materiałów konstrukcyjnych <i>Oskar Sarnecki, Valerii Prykhodzenko, Mariusz Kłonica</i>	55
Badanie charakterystyk segmentów i pakietu baterii opartych na technologii ogniw litowo-jonowych <i>Sebastian Niemiec, Jakub Kotra, Paweł Stolarczyk</i>	71
Przegląd badań i innowacji zastosowanych w autonomicznych robotach mobilnych klasy Sumo <i>Szymon Migowski, Grzegorz Muczko, Norbert Waśkiewicz, Rafał Grądzki</i>	87
Wykorzystanie sprzętu medycznego oraz technologii immersyjnych do badań przestrzeni zbudowanej <i>Natalia Makowska, Klaudia Lewko, Patrycja Matyś, Anna Sikora</i>	96

Badanie okulograficzne emocji związanych ze studenckimi wizualizacjami architektonicznymi <i>Rezan Alav, Inka Dziok, Feyza Nur Işik, Kinga Kuźmicka, Alicja Nalewajk, Michał Ponikwicki, Julia Potapo, Bartosz Śliwecki</i>	103
Wpływ technologii na bezpieczeństwo informacyjne w Polsce <i>Julia Gawron, Katarzyna Laska, Zuzanna Ścibura</i>	112
Świadomość wykorzystywania sztucznej inteligencji w procesie uczenia się studentów Politechniki Lubelskiej <i>Ewa Organista, Aleksandra Lisiecka, Konrad Kostecki, Barbara Buraczyńska</i>	121
Zastosowanie metod uczenia maszynowego w diagnozowaniu psychiatrycznym <i>Karolina Gajowiak, Diana Morzhak, Mateusz Walo, Magdalena Piłat-Rożek</i>	130
Fotografia interdyscyplinarna <i>Klaudia Anna Kojro, Ewelina Łobacz, Alina Krysztapowicz, Virsviyya Dubrounaya</i>	139
Spis tabel	147
Spis rysunków	149
Spis wykresów	151
Spis fotografii	153

Wstęp

Działalność studenckich kół naukowych stanowi istotny element kształtowania wizerunku uczelni wyższych. Współczesna nauka staje się przestrzenią dynamicznych zmian, w której innowacja i interdyscyplinarność odgrywają kluczową rolę. Proces badawczy coraz częściej wymyka się wąskim ramom dyscyplin, a granice między informatyką, inżynierią, naukami przyrodniczymi, społecznymi i humanistycznymi ulegają zatarciu. Coraz silniejsza obecność technologii cyfrowych, metod sztucznej inteligencji oraz rozwiązań z zakresu automatyki i materiałoznawstwa w różnorodnych obszarach życia codziennego wymusza nową jakość myślenia naukowego – otwartego, krytycznego, a zarazem praktycznego. W tym kontekście szczególne znaczenie zyskują badania prowadzone przez młodych naukowców, którzy podejmują aktualne i ważne społecznie tematy z wykorzystaniem nowoczesnych narzędzi badawczych.

Politechniczna Sieć VIA CARPATIA im. Prezydenta RP Lecha Kaczyńskiego, skupiająca trzy uczelnie techniczne: Politechnikę Białostocką, Politechnikę Lubelską oraz Politechnikę Rzeszowską, stworzyła platformę do szerszej prezentacji osiągnięć kół naukowych z powyższych uczelni. W ramach programu VIA CARPATIA w dniach 23–25 października 2024 roku w Białymstoku odbyła się Szósta Konferencja Kół Naukowych, w której wzięło udział piętnaście kół naukowych reprezentujących wymienione uczelnie.

Niniejsza publikacja jest przeglądem wybranych prac realizowanych w ramach projektów studenckich prowadzonych w kołach naukowych, inicjatyw badawczych oraz zespołowych przedsięwzięć naukowych na Politechnice Białostockiej, Politechnice Rzeszowskiej oraz Politechnice Lubelskiej. Zbiór obejmuje czternaście artykułów, a ich autorzy podejmują próbę rozwiązania konkretnych problemów badawczych i projektowych, wykorzystując nowatorskie podejścia, metody cyfrowe, analitykę danych, wiedzę inżynierską, jak również wrażliwość społeczną i środowiskową.

Zróznicowanie tematyczne publikacji pokazuje, jak szerokie są dziś możliwości prowadzenia badań na poziomie akademickim, nawet wśród osób rozpoczynających dopiero swoją ścieżkę naukową. Znajdujemy tu m.in. prace dotyczące wykorzystania cyfrowych modeli miast w zarządzaniu infrastrukturą wodociągową, analizę zachowania biokompozytów na bazie PLA pod wpływem abiotycznego starzenia – problematyki istotnej zarówno z punktu widzenia ochrony środowiska, jak i inżynierii materiałowej, badania nad świadomością wykorzystania sztucznej inteligencji w edukacji akademickiej, a także algorytmów uczenia maszynowego w diagnostyce psychiatrycznej – zagadnień z pogranicza informatyki, psychologii i pedagogiki.

Publikacja zawiera też artykuły ukazujące praktyczne aspekty pracy inżynierskiej, m.in. wpływ parametrów druku 3D na jakość wytwarzanych komponentów, budowę mobilnej platformy z zawieszeniem na kołach mecanum czy zwiększenie funkcjonalności robotów współpracujących poprzez integrację systemów wizyjnych i sterowania głosowego. Nie zabrakło również tematów z zakresu bezpieczeństwa informacyjnego, technologii energetycznych (np. badania nad pakietami baterii litowo-jonowych) czy nowoczesnych metod analizy przestrzeni miejskiej z wykorzystaniem technologii immersyjnych oraz sprzętu medycznego.

Odrębną, lecz równie istotną część publikacji stanowią prace wpisujące się w nurt humanistyki cyfrowej i nauk społecznych, takie jak analiza emocji odbiorców wizualizacji architektonicznych z użyciem badań okulograficznych, interdyscyplinarne ujęcie fotografii, a także przegląd innowacji w zakresie autonomicznych robotów mobilnych klasy Sumo. Ich obecność w niniejszym tomie świadczy o głębokim zrozumieniu, że rozwój technologiczny nie może odbywać się w oderwaniu od społecznego i kulturowego kontekstu.

Wspólnym mianownikiem wszystkich zaprezentowanych prac jest praktyczne podejście do problemu badawczego, ściśle powiązanie teorii z eksperymentem oraz gotowość do poszukiwania innowacyjnych rozwiązań. Artykuły te są dowodem na to, że młode pokolenie badaczy potrafi nie tylko korzystać z nowoczesnych narzędzi, lecz także twórczo je rozwijać i implementować w różnych dziedzinach nauki i gospodarki.

Publikacja ma na celu prezentację wyników badań, jak też promocję kultury naukowej wśród studentów i młodych naukowców. Stanowi również zachętę do podejmowania własnych inicjatyw badawczych oraz rozwijania kompetencji w zakresie pracy zespołowej, analizy danych, krytycznego myślenia i popularyzacji nauki. Mamy nadzieję, że zawarte w niej teksty zainspirują kolejne pokolenia do aktywnego uczestnictwa w życiu naukowym oraz do dalszego rozwijania idei współpracy międzydziedzinowej i międzyśrodowiskowej.

Wszystkie artykuły są dowodem na to, że kreatywność, zaangażowanie i otwartość na nowe technologie są siłą napędową współczesnej nauki. Wierzimy, że niniejsza publikacja będzie nie tylko źródłem wiedzy, lecz także inspiracją do dalszych poszukiwań naukowych i międzyobszarowej współpracy.

Wykorzystanie wirtualnych miast w wodociągach

Weronika Małek, Michał Zieliński, Paweł Suchorab

Studenckie Koło Naukowe Wodociągów i Kanalizacji Hydros, Politechnika Lubelska

1. Wstęp

Systemy wodociągowe są zbiorem elementów, które umożliwiają dostarczenie wody o odpowiedniej jakości i pod odpowiednim ciśnieniem, w czasie i ilości określonych przez odbiorcę końcowego [10]. Systemy zaopatrzenia w wodę należą do elementów infrastruktury krytycznej [9], która odgrywa kluczową rolę w funkcjonowaniu państwa i obywateli [3]. Wojny, ataki terrorystyczne czy katastrofy naturalne wymusiły konieczność zwrócenia uwagi na powszechny dostęp do informacji o systemach dystrybucji wody [2]. W celu ochrony użytkowników systemów wodociągowych większość przedsiębiorstw ograniczyła dostęp do danych wrażliwych, przechodząc z publicznego przeglądania informacji w internecie na ograniczony, który wymaga poświadczenia poufności. Ograniczenie takie, chociaż w pełni uzasadnione z punktu widzenia bezpieczeństwa, stanowi utrudnienie w prowadzeniu badań polegających na testowaniu nowych metod projektowania, zarządzania i optymalizacji sieci wodociągowych [8]. Wszelkie analizy i badania na rzeczywistych obiektach wymagają każdorazowo zgody właściciela sieci oraz takiego przedstawienia prezentowanych wyników, by niemożliwa była identyfikacja wykorzystanej sieci wodociągowej. Dlatego też obecnie, aby móc swobodnie testować nowo opracowywane metody projektowe i eksploatacyjne, stosuje się obiekty quasi-rzeczywiste, takie jak „wirtualne miasta” [2].

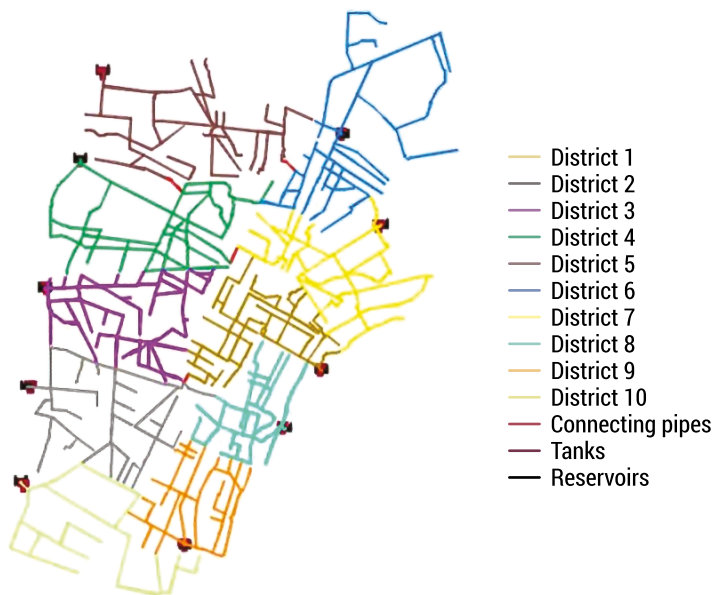
Są one zbiorem cyfrowego „wymyślnego” układu elementów, w którego skład wchodzi podziemna i naziemna infrastruktura techniczna, charakterystyka geograficzna, hipsometryczna czy demografia [2]. Poza opracowaniem struktur miasta ważne jest nadanie mu kontekstu historycznego, który uwzględnia rozwój poszczególnych wirtualnych dzielnic w czasie. Wszystkie wymienione składowe mają realistycznie odtworzyć charakter infrastruktury wymyślnego miasta. Te istniejące są inspiracją do tworzenia wirtualnych jednostek osadniczych, lecz przy zachowaniu bezpiecznej analogii. Dlatego też żadne z nich nie odwzorowuje prawdziwego systemu dystrybucji wody [2]. Przykładami wirtualnych miast najczęściej spotykanymi w literaturze są: C-Town [6], D-Town [5], Micropolis [8], Mesopolis [7] oraz Ideal City [1].

Wykorzystanie referencyjnych obiektów badań pozwala łatwo porównywać wyniki pomiędzy metodami testowanymi przez różnych badaczy.

W niniejszym artykule o charakterze przeglądowym przybliżono koncepcję kilku wybranych wirtualnych miast: Ideal City, Micropolis, Mesopolis oraz C-Town. Porównano je pod kątem liczebności jednostki osadniczej, charakterystyk systemów wodociągowych (długość sieci, sumaryczne zapotrzebowanie na wodę) oraz zastosowania do różnych celów badawczych.

2. Ideal City

Ideal City [1] jest wirtualnym miastem opracowanym w środowisku GIS. Liczy około 900 000 mieszkańców i obejmuje infrastrukturę krytyczną, czyli sieci: wodociągową, kanalizacyjną, elektroenergetyczną, gazową oraz transportową. Celem jego stworzenia było zbadanie wpływu trzęsienia ziemi na system wodociągowy [1]. Wzorem dla Ideal City był położony w północno-zachodnich Włoszech Turyn. Fikcyjna sieć wodociągowa, przedstawiona na rys. 1, została podzielona na 10 stref. Każda z nich jest zasilana za pomocą tylko jednego przewodu. Wykorzystanie kilku ujęć wody, w przypadku awarii lub naprawy sieci, umożliwia wyizolowanie danego obszaru bez zakłócenia prawidłowej pracy w innych obszarach wirtualnego miasta [1].



RYS. 1. Podział sieci wodociągowej na strefy zasilania w wirtualnym mieście Ideal City

ŹRÓDŁO: [1].

Do symulacji funkcjonowania sieci wodociągowej w Ideal City losowo założono liczbę mieszkańców, turystów oraz osób dojeżdżających do pracy. Na podstawie analogicznych miast przyjęto wartość dobowego zapotrzebowania na wodę na mieszkańca i określono jej średnie zużycie w każdej dzielnicy. Służy ono do obliczenia bazowego zapotrzebowania w poszczególnych węzłach przy założeniu, że pobór wody w każdym węźle jest proporcjonalny do długości przewodów doprowadzających. Założony został 24-godzinny wzorzec czasowy poboru wody dla wszystkich użytkowników systemu wodociągowego, z uwzględnieniem nierównomierności jej wykorzystywania w ciągu roku. Całkowite średnie dobowe zapotrzebowanie na wodę dla Ideal City wynosi $263\ 300\ \text{m}^3/\text{d}$.

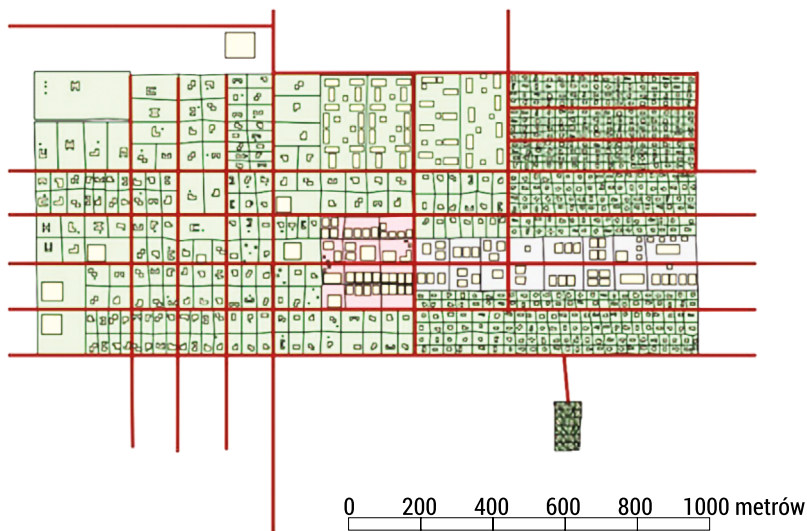
Wirtualny model hydrauliczny w Ideal City został opracowany za pomocą programu EPANET 2.0. Model ten zawiera: 462 węzły, 525 odcinków (których długość całkowita wynosi 263,7 km), 9 zaworów redukujących ciśnienie, 10 pomp, 10 źródeł wody oraz 10 zbiorników wyrównawczych. Średnia założona głębokość posadowienia przewodów wodociągowych wynosi 1,2 m poniżej terenu. Rzędne terenowe wirtualnego miasta zawierają się w przedziale od 213,99 m n.p.m. do 276,93 m n.p.m. Założono, że sieć wodociągowa w Ideal City wykonana jest z żeliwa sferoidalnego. W celu jak największego urealnienia pracy systemu wodociągowego uwzględniono jego niedoskonałości montażowe poprzez nieprawidłowe lokalizacje zaworów. Dwoma źródłami zasilającymi system wodociągowy tego cyfrowego miasta są rzeka oraz warstwy wodonośne. Woda wtłaczana jest za pomocą pomp o odpowiedniej charakterystyce hydraulicznej, zależnej od różnicy wysokości pomiędzy zbiornikiem i źródłem oraz od całkowitego przepływu [1].

3. Micropolis

Wirtualne miasto Micropolis [8] zostało opracowane przy wykorzystaniu systemu informacji geograficznej GIS (oprogramowanie ArcView 3.2 i ArcMap 9,0) oraz modelu hydraulicznego (oprogramowanie EPANET 2.0). Stworzono je, by przeanalizować zachowanie systemu wodociągowego w przypadku pożaru i uruchomienia hydrantu przeciwpożarowego na terenie miasta oraz rozprzestrzenianie się zanieczyszczeń w sieci wodociągowej.

Cyfrowe miasto Micropolis liczy blisko 5000 mieszkańców [8]. Jego wiek szacowany jest na około 130 lat. Miasto zostało ulokowane w latach pięćdziesiątych XIX wieku w historycznie wiejskim regionie jako mała osada przy linii kolejowej. Przy jego tworzeniu uwzględniono rozwój od momentu założenia, stąd występowanie zróżnicowanej struktury materiałowej przewodów (żeliwo szare, azbestocement, żeliwo sferoidalne). W Micropolis są 434 działki mieszkalne, 15 przemysłowych oraz 9 usługowych, co sumarycznie daje 458 węzłów odbiorczych. Schemat zagospodarowania przestrzennego Micropolis przedstawiono na rys. 2. Dobowe

średnie zapotrzebowanie w różnych sektorach przyjęto na podstawie dostępnych tabel referencyjnych [4]. Szacunkowe całkowite dobowe zapotrzebowanie na wodę wynosi $4540 \text{ m}^3/\text{d}$ [2].



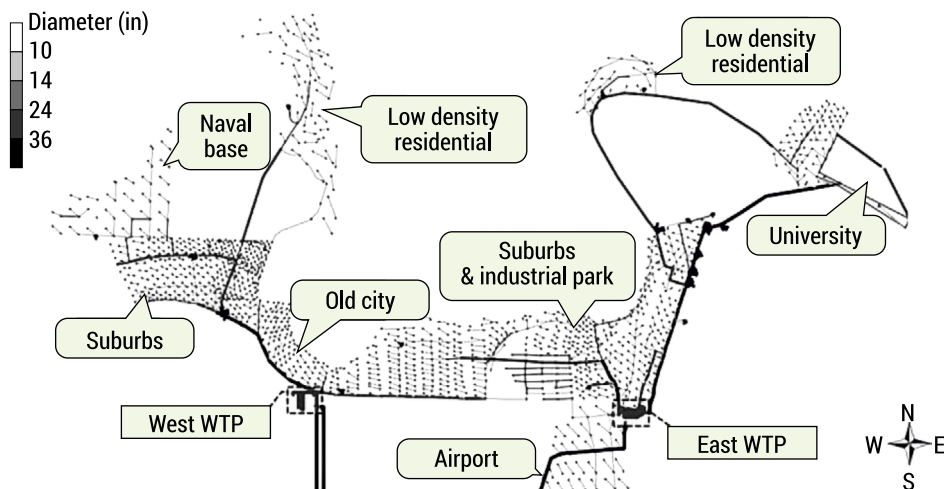
RYS. 2. Zagospodarowanie Micropolis (kolor jasnozielony – zabudowa mieszkaniowa, różowy – usługowa, szary – przemysłowa)

ŹRÓDŁO: [2].

Mimo stosunkowo niewielkiego rozmiaru Micropolis możliwa jest pełna symulacja systemu dystrybucji wody [2]. W celu opracowania bardziej realistycznego i niedoskonałego systemu uwzględniono błędne podłączenie do sieci wodociągowej oraz umiejscowienie hydrantów niezgodnie z przepisami [8]. Model hydrauliczny zawiera ponad 1200 węzłów, 575 przewodów o łącznej długości około 16 km, a także 486 przyłączy i podejść hydrantowych. Dodatkowo uwzględniono obecność 197 zasuw, 28 hydrantów, 8 pomp, 2 źródeł wody oraz zbiornika sieciowego [2].

4. Mesopolis

Mesopolis to cyfrowe nadmorskie miasto liczące około 150 000 mieszkańców, o szkieletowym modelu sieciowym zaprojektowanym za pomocą programu EPANET 2.0. Założeniem twórców było stworzenie miasta o znacznym zróżnicowaniu topograficznym w celu powstania bardziej złożonego systemu wodociągowego, na podstawie którego zbadano prawdopodobieństwo zmniejszenia popytu na wodę, wykorzystując wyniki badań ankietowych dotyczące reakcji odbiorców na sytuacje kryzysowe, m.in. niedobór wody [7]. Przestrzenną reprezentację Mesopolis przedstawiono na rys. 3.



RYS. 3. Wirtualne miasto Mesopolis

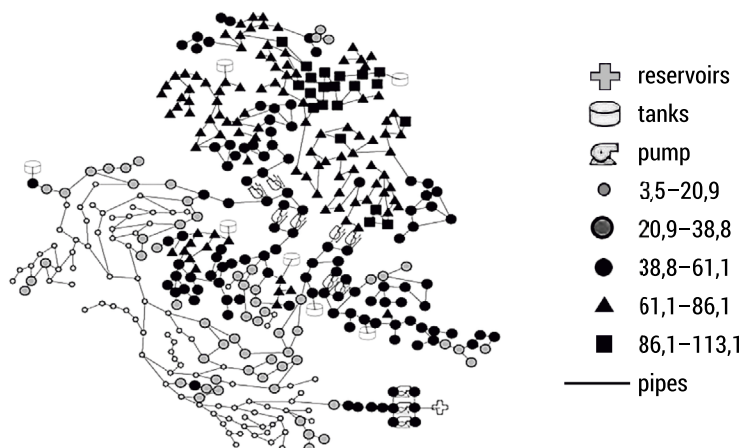
ŹRÓDŁO: [7].

W Mesopolis znajdują się obszary mieszkalne, handlowe oraz przemysłowe, a także port, lotnisko i uniwersytet. Płynąca przez centrum miasta rzeka jest źródłem wody dostarczanej do dwóch stacji jej uzdatniania. Zachodnia stacja wodociągowa zaopatrza w wodę starsze obszary Mesopolis, natomiast wschodnia kieruje ją w okresach szczytowego zapotrzebowania do centralnych i wschodnich części. Szkieletowy model sieci składa się ze źródła wody, 1588 węzłów, 2058 przewodów, 13 zbiorników oraz 65 pomp. W zależności od sposobu użytkowania gruntu (mieszkalne, handlowe, przemysłowe i morskie) dla różnych węzłów przyjmowane są różne wartości zapotrzebowania na wodę. Liczbę użytkowników w każdym z węzłów na terenie mieszkalnym oblicza się, dzieląc wartość zapotrzebowania bazowego w danym węźle przez dzienne zużycie wody na konsumenta, które przyjęto na 398 litrów na osobę. Założono stałą liczbę mieszkańców do każdego węzła oraz brak zmian tych wartości w ciągu dnia. Dobowe zapotrzebowanie dla każdego z konsumentów jest równomiernie rozłożone na pięć zdarzeń przyjmowanych o godzinach: 7:00, 9:30, 12:00, 15:00 oraz 18:00 [7].

5. C-town

Wirtualne miasto C-Town [6] zostało opracowane w celu przeprowadzenia badań wykrycia nieszczelności w sieciach wodociągowych poprzez montaż czujników ciśnienia w ich wybranych węzłach [6]. Wycieki w sieciach wodociągowych powodują straty wody, co ma konsekwencje zarówno środowiskowe, jak i ekonomiczne. Do zaprojektowania miasta C-Town wykorzystano oprogramowanie EPANET 2.0 powiązane z biblioteką NSGA-II przy użyciu oprogramowania MATLAB. Sieć wodociągowa

C-Town jest podobna do rzeczywistych systemów wodociągowych, ale jest to system szkieletowy. C-Town ma pięć odrębnych stref ciśnienia, które różnią się od siebie regionami topograficznymi. Strukturę geometryczną sieci przedstawiono na rys. 4.



RYS. 4. Struktura geometryczna sieci dystrybucji wody C-Town

ŹRÓDŁO: [6].

Model hydrauliczny składa się z 388 węzłów, 7 zbiorników na wodę, źródła wody oraz 11 pomp. Sumaryczna długość przewodów tworzących sieć w mieście C-Town wynosi 37,8 km [6]. Wycieki są zadane we wszystkich węzłach z wyjątkiem tych zlokalizowanych za każdą z pomp. Czas symulacji wynosi 96 godzin. Modelowanie obejmuje cztery okresy, które zostały określone na podstawie dobowego zapotrzebowania na wodę. Pierwszy trwa od północy do 6:00, podczas którego zapotrzebowanie jest minimalne. Drugi zaczyna się o 6:00 i trwa do południa, a maksymalne zapotrzebowanie obserwuje się w porze lunchu. W okresie popołudniowym, od 12:00 do 18:00, utrzymuje się ono na najwyższym poziomie dla sektora usług i przemysłu, na najniższym zaś poziomie dla mieszkańców. Ostatni okres zaczyna się o 18:00 i trwa do północy. Sumaryczne zapotrzebowanie na wodę miasta wynosi 150 000 m³/d [6].

6. Podsumowanie

W artykule przedstawiono koncepcję wykorzystania wirtualnych miast do analiz projektowych, eksploatacyjnych i optymalizacyjnych w zakresie zaopatrzenia w wodę. Są to fikcyjne plany jednostek osadniczych z opracowanymi strukturami geograficzną, historyczną i infrastrukturalną. Ich wykorzystanie daje możliwość testowania nowych metod bez konieczności przeprowadzania badań na obiektach rzeczywistych.

Omówione w pracy wirtualne miasta (Ideal City, Micropolis, Mesopolis oraz C-Town) porównano pod kątem zastosowania, liczby ludności oraz charakterystyk systemów wodociągowych (średnie dobowe zapotrzebowanie na wodę, sumaryczna długość sieci), a ich szczegółowe parametry zestawiono w tabeli 1. Warto odnotować, że pomimo różnej wielkości oraz przeznaczenia wszystkie omówione miasta zostały opracowane z uwzględnieniem charakterystyk geograficznych (lokalizacja, ukształtowanie terenu, źródła wody) i historycznych (rozwój i rozbudowa miast). Wykorzystano do tego odpowiednie oprogramowanie, zazwyczaj systemy GIS oraz narzędzia do modelowania hydraulicznego.

Zaprojektowane wirtualne miasta nie są idealne. Podczas ich tworzenia autorzy podjęli próby urzeczywistnienia ich struktury, np. poprzez celowe popełnianie błędów projektowych. Jednakże wirtualne miasta są jedynie „krzywym” odzwierciedleniem realnych jednostek osadniczych. Należy pamiętać, że symulacje na obiektach quasi-rzeczywistych nie zawsze dadzą jednoznaczną odpowiedź na prawdziwe wydarzenia. Stąd też w końcowej fazie testowania nowych metod i narzędzi należy dążyć do przeprowadzenia badań na obiektach rzeczywistych, z zachowaniem odpowiedniego poziomu anonimowości.

TABELA 1. Wirtualne miasta w zestawieniu

	Ideal City	Micropolis	Mesopolis	C-Town
Autor	Bianco i in.	Brumbelow i in.	Brumbelow i in.	Raei i in.
Zastosowanie	analiza odporności systemu wodociągowego na skutki trzęsienia ziemi	analizy jakościowe i bezpieczeństwa przeciwpożarowego	analiza zmian zapotrzebowania na wodę	wykrywanie nieszczelności
Długość sieci	263,37 km	16,0 km	–	37,8 km
Dobowe zapotrzebowanie na wodę	263 300 m ³ /d	4540 m ³ /d	–	150 000 m ³ /d
Liczba węzłów	462	1200	1588	388
Liczba pomp	10	8	65	11
Liczba zbiorników	20	3	14	8
Mieszkańcy (ok.)	900 000	5000	150 000	–
Źródło wody	rzeka, warstwy wodonośne	woda powierzchniowa, zbiornik retencyjny	rzeka	zbiorniki retencyjne

ŹRÓDŁO: [1], [2], [6], [7], [8].

Literatura

- [1] Bianco M., Cimellaro G., Wilkinson S., *Virtual city for water distribution research in crisis management*, [w:] *COMPADYN 2017. Proceedings of the 6th International Conference on Computational Methods in Structural Dynamics and Earthquake Engineering*, t. 1, Torino–Newcastle 2017, s. 2075–2088.
- [2] Brumbelow K., Torres J., Guikema S., Bristow E., Kanta L., *Virtual Cities for Water Distribution and Infrastructure System Research*, [w:] *World Environmental and Water Resources Congress 2007: Restoring Our Natural Habitat*, red. K.C. Kabbes, Tampa 2007.
- [3] Rządowe Centrum Bezpieczeństwa, *Systemy infrastruktury krytycznej*, <https://www.gov.pl/web/rcb/systemy-infrastruktury-krytycznej> [dostęp: 9.10.2024].
- [4] Heasted M., Walski T.M., Chase D.V., Savic D.A., Grayman W.M., Beckwith S, Koelle E., *Advanced Water Distribution Modeling and Management*, Waterbury 2003.
- [5] Mashhadi Ali A., Kandiah V., Zechman Berglund E., *Multiobjective Optimization to Explore Tradeoffs in Rainwater Harvesting Strategies for Urban Water Sustainability*, [w:] *World Environmental and Water Resources Congress 2014: Water without Borders*, red. W.C. Huber, North Carolina 2014, s. 1812–1817.
- [6] Raei E., Ehsan Shafiee M., Nikoo M., Berglund E., *Placing an ensemble of pressure sensors for leak detection in water distribution networks under measurement uncertainty*, „Journal of Hydroinformatics” 2019, nr 21(2), s. 223–239.
- [7] Rasekh A, Ehsan Shafiee M., Zechman E., Brumbelow K., *Sociotechnical risk assessment for water distribution system contamination threats*, „Journal of Hydroinformatics” 2014, nr 16(3), s. 531–549.
- [8] Torres J., *Micropolis: A virtual city for water distribution system research applications*, Texas 2006.
- [9] Ustawa z dnia 26 kwietnia 2007 r. o zarządzaniu kryzysowym (Dz.U. 2007 nr 89 poz. 590).
- [10] Ustawa z dnia 7 czerwca 2001 r. o zbiorowym zaopatrzeniu w wodę i zbiorowym odprowadzaniu ścieków (Dz.U. 2001 nr 72 poz. 747).

Key words: virtual cities, digital cities, water distribution network

Innowacyjne wykorzystanie kory wierzby oraz dębu wzbogaconych grafenem do usuwania jonów metali ciężkich z roztworów wodnych

*Grzegorz Sawicki, Maciej Gil, Jakub Łapicz, Łukasz Kozicki,
Ewelina Gołębiowska, Grzegorz Świdorski
Koło Naukowe Helisa, Politechnika Białostocka*

1. Wstęp

Środowisko wodne jest narażone na zanieczyszczenia metalami ciężkimi. Ich źródłem może być przemysł wydobywczy, hutniczy, energetyczny, chemiczny, elektroniczny i elektrochemiczny. Powstające dymy, pyły, odpady przemysłowe mogą się przenosić wraz z wiatrem czy opadami atmosferycznymi pośrednio przez glebę lub bezpośrednio do wód. To w nich metale ciężkie mogą występować w postaci rozpuszczonych hydratowanych jonów, organicznych kompleksów oraz par jonowych związanych z wielkocząsteczkowymi związkami chemicznymi, czyli koloidów, bądź zawiesinami. W każdej z tej postaci mogą być przyswajane przez organizmy żyjące w wodzie. Rośliny mogą pobierać i magazynować szkodliwe metale zarówno w częściach zielonych, jak i w systemie korzeniowym. Następnie rośliny konsumowane są przez zwierzęta, co powoduje dalsze przenoszenie toksycznych metali w łańcuchu pokarmowym [5]. Metale ciężkie, takie jak ołów (Pb), kadm (Cd), miedź (Cu) czy rtęć (Hg), stanowią poważne zagrożenie dla organizmów żywych – i lądowych, i wodnych. Wiele z nich może zastępować kluczowe dla organizmu pierwiastki, zakłócając funkcjonowanie pojedynczych enzymów oraz całego organizmu. Ołów, rtęć czy kadm mogą oddziaływać na grupy tiolowe białek, które są kluczowe dla prawidłowej konformacji cząsteczki, a ich zablokowanie przez metal może spowodować dezaktywację enzymu, co prowadzi do zaburzeń metabolicznych. Kadm i rtęć jako jony dwuwartościowe mogą zastępować cynk, pełniąc funkcję inhibitorów, co również prowadzi do ich dezaktywacji. Szczególnie niebezpieczna jest rtęć w postaci metaloorganicznej, takiej jak metylortęć, która wykazuje wysoką zdolność do biomagnifikacji i bioakumulacji. Wbudowuje się ona w tkanki mięśniowe i tłuszczowe zwierząt, uszkadzając układ nerwowy, rozrodczy oraz wątrobę [6].

Sorbenty to substancje zdolne do absorpcji i adsorpcji innych związków chemicznych poprzez wnikanie wewnątrz ich struktury lub osiadanie i wiązanie na ich powierzchni. Chalcedonit to skała krzemionkowa o wysokiej porowatości wahającej się od 14,0% do 35,0% oraz dużej nasiąkliwości – od 3,4% do 14,0%. Te cechy fizyczne decydują o jego wysokich właściwościach sorpcyjnych metali takich jak żelazo [7]. Bentonity to skały ilaste z wysoką powierzchnią właściwą skłonną do magazynowania wody w przestrzeniach międzywarstwowych. Ze względu na zdolność do wymiany kationów i obecność w większości gleb są wykorzystywane do pochłaniania metali ciężkich [8]. Torf jako skała osadowa ma dobre właściwości wymienne kationów bez konieczności uprzedniej obróbki termicznej lub chemicznej, która jednak niweluje jego wady, tj. słabą wytrzymałość mechaniczną, zmiany objętości oraz pochłanianie dużej ilości wody [9].

Kora (łac. *cortex*) to najbardziej zewnętrzna część rośliny, która chroni łodygi drzew, krzewów i krzewinek przed działaniem szkodliwych czynników chemicznych i mechanicznych. Jako martwa tkanka okrywa nie tylko łodygi, lecz także korzenie. Powstaje podczas wielokrotnych podziałów komórek miękiszu łyka. Fellogen, czyli miazga korkotwórcza, produkuje w wyniku podziałów wzdłużnych nowe warstwy komórek na zewnątrz i do wnętrza, co tworzy perydermę. W porównaniu z drewnem kora drzew wykazuje znaczne zróżnicowanie pod względem budowy anatomicznej, składu chemicznego, właściwości mechanicznych i fizycznych [10]. Jest głównym odpadem z przemysłu leśnego oraz celulozowo-papierniczego, który może być szczególnie uciążliwy ze względu na znaczną objętość, jaką zajmuje podczas składowania. W latach dziewięćdziesiątych XX wieku z przetwarzanego drewna iglastego i liściastego powstawało około 1,7 mln m³ odpadów tego materiału rocznie. Dzięki dużej dostępności i zawartości związków mineralnych kora znalazła zastosowanie jako nawóz w postaci granulatu [1].

Od wieków kora drzew była znana ze swoich leczniczych właściwości. W 1830 roku Leroux wyizolował z kory wierzby (*Salix helix* L) aktywny związek fenolowy, który później nazwał salicyną. W składzie kory wierzby białej można znaleźć szereg glikozydów salicylowych, takich jak salikortyna, salicyna, salidrozyd, populina, salirepozyd, 3-O-cynamoilosalicyna, a także garbniki: kwas taninowy, katechinę, flawonoidy, żywice i związki mineralne [11]. Dzięki ich obecności kora drzew ma zdolności sorpcyjne umożliwiające wiązanie metali ciężkich, takich jak miedź, której stężenie w ściekach przemysłowych może osiągać nawet 200 mg/l [12]. Kora może również służyć do selektywnego usuwania kationów toksycznych metali ciężkich, takich jak: Pb²⁺, Zn²⁺, Cr²⁺, Fe²⁺ i Cu²⁺, poprzez wymianę jonów metali na protony obecne na jej powierzchni [13].

Kora drzew odgrywa też istotną rolę w ochronie środowiska – wykorzystuje się ją jako bioindykator w wykrywaniu zanieczyszczenia powietrza pyłami cementowo-wapiennymi. Spadające na ziemię pyły powodują zmianę pH gleby w kierunku zasadowym, w związku z czym zmienia się również pH wody zawartej w korze [14]. Właściwości sorpcyjne kory nie wynikają z jej struktury porowatej, lecz z właściwości chemicznych jej powierzchni. Używając spektroskopii w podczerwieni, wykazano obecność m.in. grup karboksylowych, karbonylowych, hydroksylowych, estrowych

oraz związków fenolowych, które zdolne są do wiązania jonów metali ciężkich. Dzięki tym związkom kora drzewna wykazuje wysoką zdolność do chemisorpcji. Badania nad jej teksturą, morfologią oraz analizą termiczną potwierdziły, że wiązanie metali ciężkich zachodzi głównie na drodze chemisorpcji z udziałem grup funkcyjnych. Pomimo stosunkowo niewielkiej powierzchni właściwej kora wykazuje wysokie zdolności sorpcyjne [15]. Z tych względów znalazła zastosowanie w różnych gałęziach przemysłu, takich jak farmacja, kosmetologia, sadownictwo. Wykorzystywana jest także m.in. jako hydrofobowy dodatek do zagęszczania preparatów do mycia, które mają działanie przeciwzapalne, antyutleniające i ściągające [16].

Grafen to dwuwymiarowa warstwa węgla o grubości jednego atomu. W jego skład wchodzi atomy węgla mające hybrydyzację sp^2 , ułożone w jednorodnej heksagonalnej sieci krystalicznej. Jako odmiana alotropowa węgla grafen ma niezwykłą wytrzymałość, stabilność, elastyczność i dużą powierzchnię właściwą oraz idealne przewodnictwo elektryczne, które zawdzięcza swojej budowie. Jednak adsorpcja metali ciężkich na jego powierzchni może zostać zainicjowana tylko przez ich wcześniejsze przeprowadzenie do hydrofobowych kompleksów organicznych. To poważnie ogranicza zdolności adsorpcyjne grafenu względem jonów metali ciężkich [17, 18]. Rozwiązaniem tego problemu jest jego pochodna – tlenek grafenu. Wykazuje podobne właściwości do protoplasty, z wyjątkiem adsorpcji hydrofilowych cząsteczek. Modyfikowany chemicznie arkusz grafenu ma na swojej powierzchni tlenowe grupy funkcyjne z wolnymi parami elektronowymi, które skutkują wysoką zdolnością do adsorpcji jonów metali ciężkich przez tworzenie wiązań koordynacyjnych. Dodatkową korzyścią modyfikacji jest możliwość zmian struktury materiału, co prowadzi do selektywnego oddziaływania z danym metalem oraz zwiększa dyspersję w wodzie dzięki oddaleniu się warstw w zawiesinie koloidalnej [18].

2. Metodyka

2.1. Przygotowanie kory *Salix alba* i *Quercus robur* do badań

Korę wierzby białej oraz dębu szypułkowego przez 24 godziny suszono w cieplarni w temperaturze 40°C aż do uzyskania stałej wilgotności. Następnie biomateriał w młóźnie rozdrobniono do postaci proszku i przeniesiono do odpowiednich szklanych pojemników.

2.2. Przygotowanie biomateriału do sorpcji metali ciężkich

Do szklanych butelek o pojemności 50 ml, wyposażonych w szczelne nakrętki, odważono próbki biomateriału o masie 0,1 g, 0,075 g oraz 0,05 g. Następnie przygotowano chlorki odpowiednich jonów metali: chlorek ołowiu (II) o stężeniu 175 mg/l, chlorek

miedzi (II) o stężeniu 50 mg/l oraz chlorek cynku (II) o stężeniu 50 mg/l, które dodano do biomateriałów, szczelnie zakręcono i na godzinę umieszczono w wytrząsarce w temperaturze 25°C, 40°C oraz 50°C. Po zakończeniu wytrząsania roztwory oddzielono od biomateriału za pomocą sączka. Czynności te powtórzono, lecz do biomateriału dosypano 0,05 g grafenu. Zmieniono również stężenia chlorku miedzi (II) na 75 mg/l oraz chlorku ołowiu (II) na 250 mg/l.

2.3. Oznaczenie stężenia chlorków po wytrząsaniu biomateriału

Do oceny stężenia jonów metali w przesączu pobrano 1 ml przesączu, który następnie umieszczono w kolbie miarowej o pojemności 10 ml. Do próbki dodano 1 ml 0,5-procentowego roztworu PAR oraz 1 ml buforu boranowego, a całość uzupełniono wodą destylowaną do kreski. Pomiar absorbancji przeprowadzono za pomocą spektrofotometru UV-VIS przy długościach fal: 498 nm, 510 nm oraz 518 nm, odpowiadającym poszczególnym jonom metali. Uzyskane wartości absorbancji przeliczono na stężenia jonów metali na podstawie krzywych wzorcowych: $y = 0,3704x - 0,0268$ ($R^2 = 0,9832$) dla jonów miedzi, $y = 0,137x - 0,0219$ ($R^2 = 0,9995$) dla jonów ołowiu (II) oraz $y = 0,7887x - 0,0091$ ($R^2 = 0,998$) dla jonów cynku. Każdy pomiar wykonano pięciokrotnie w ramach trzech niezależnych doświadczeń. Wyniki opracowano w programie Microsoft Excel 2019.

2.4. Przygotowanie biomateriału do ekstrakcji ultradźwiękowej

Do szklanych butelek odważono 0,4 g naważki kory dębowej i wierzbowej, po czym dodano 25 ml wody destylowanej. Ekstrakcję z zastosowaniem ultradźwięków prowadzono przez godzinę w temperaturze 40°C. Po jej zakończeniu roztwory oddzielono od biomateriału za pomocą sączka.

2.5. Oznaczenie zawartości związków fenolowych

Zawartość związków fenolowych oznaczono spektrofotometrycznie z wykorzystaniem odczynnika Folina-Ciocalteu. W tym celu do probówek dodano: 250 µl ekstraktu z kory, 250 µl odczynnika Folina-Ciocalteu rozcieńczonego wodą destylowaną 1 : 1, 500 µl 14-procentowego roztworu węglanu sodu oraz 4 ml wody destylowanej. Probki inkubowano przez godzinę w zaciemnionym miejscu. Równolegle przygotowano próbę zerową. Absorbancję mierzono spektrofotometrycznie przy długości fali równej 760 nm. Ponadto wykonano krzywą wzorcową kwasu galusowego dla stężeń od 5 do 110 mg/dm³ i wyznaczono równanie krzywej wzorcowej o wzorze $y = 0,0078x + 0,0186$ ($R^2 = 0,9971$). Na jej podstawie obliczono stężenie związków fenolowych w badanych ekstraktach. Każdą próbę oznaczono

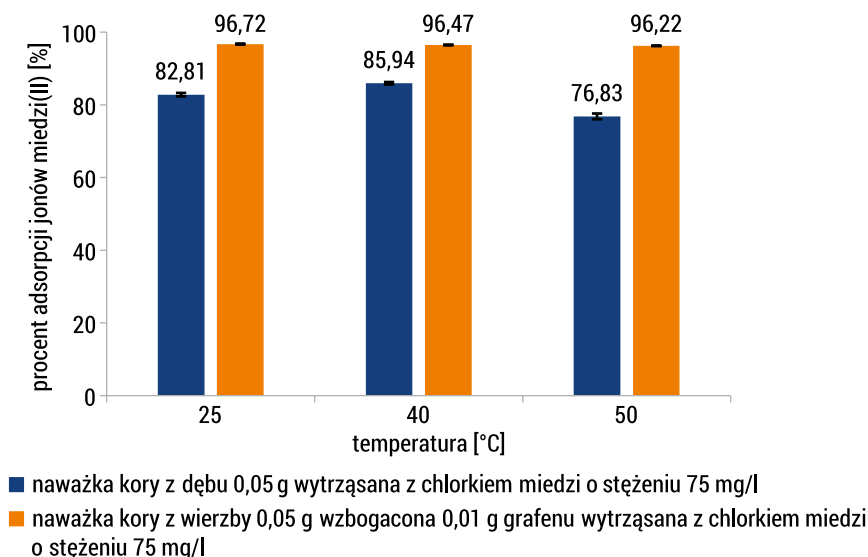
pięciokrotnie w trzech niezależnych doświadczeniach. Wyniki opracowano w programie Microsoft Excel 2019.

3. Wyniki

3.1. Sorpcja jonów miedzi do kory dębowej i wierzbowej

Na rys. 1–6 przedstawiono efektywność sorpcji jonów miedzi (II), ołowiu (II) oraz cynku (II) przez korę wierzbową *Salix alba* i dębową *Quercus robur*, a także efektywność sorpcji tych metali przez badane biomateriały, wzbogacone o 0,05 g grafenu.

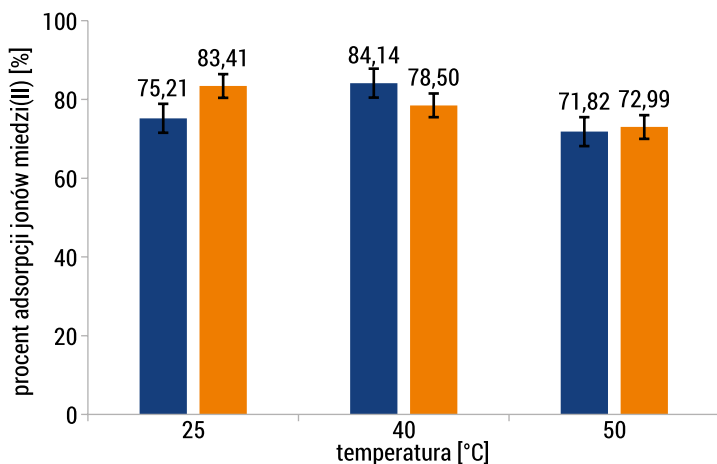
Wykazano, że dodatek grafenu do kory dębu zwiększa jej zdolności sorpcyjne wobec jonów Cu^{2+} z roztworu wodnego o około 10% w porównaniu z próbami, w których jako materiał sorpcyjny badana była kora dębu bez dodatku grafenu (rys. 1). Najwyższy stopień sorpcji wykazały próbki z dodatkiem grafenu poddane wytrząsaniu w temperaturze 25°C.



RYS. 1. Stopień adsorpcji jonów Cu^{2+} do kory dębu i kory dębu z dodatkiem grafenu

ŹRÓDŁO: oprac. własne.

Nie zaobserwowano znaczącego wzrostu zdolności sorpcyjnej kory wierzbowej po dodaniu grafenu (rys. 2). Najwyższy procent sorpcji jonów miedzi (II) przez korę wierzbową odnotowano dla roztworu ogrzanego do temperatury 40°C. W temperaturze 25°C również mamy podobny procent sorpcji, lecz stężenie roztworu wyjściowego jest niższe.

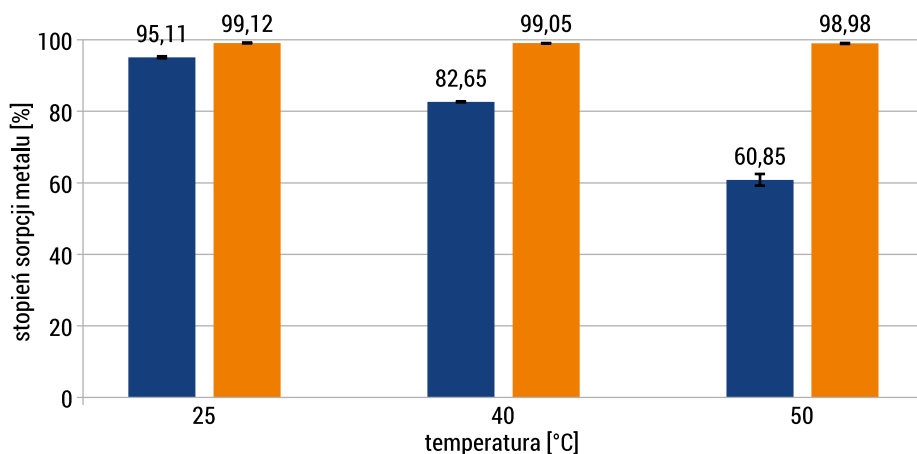


■ naważka kory z wierzby 0,05 g wzbogacona 0,01 g grafenu wytrąsana z chlorkiem o stężeniu 75 mg/l
 ■ naważka kory z wierzby 0,05 g wytrąsana z chlorkiem miedzi o stężeniu 50 mg/l

RYS. 2. Stopień adsorpcji jonów Cu^{2+} do kory dębowej i kory wierzbowej z dodatkiem grafenu

ŹRÓDŁO: oprac. własne.

Badania zdolności usuwania ołowiu przez korę dębową wykazały, że dodatek grafenu do biomateriału wspomaga jego możliwości sorpcyjne, od 4% do 38% (rys. 3). Najwyższy stopień sorpcji uzyskano w temperaturze 25°C w próbkach z dodanym grafenem. Próbką z korą dębową bez dodanego grafenu w 25°C wykazała sorpcję na poziomie jedynie o 4% mniejszym niż w przypadku kory z dodanym grafenem.

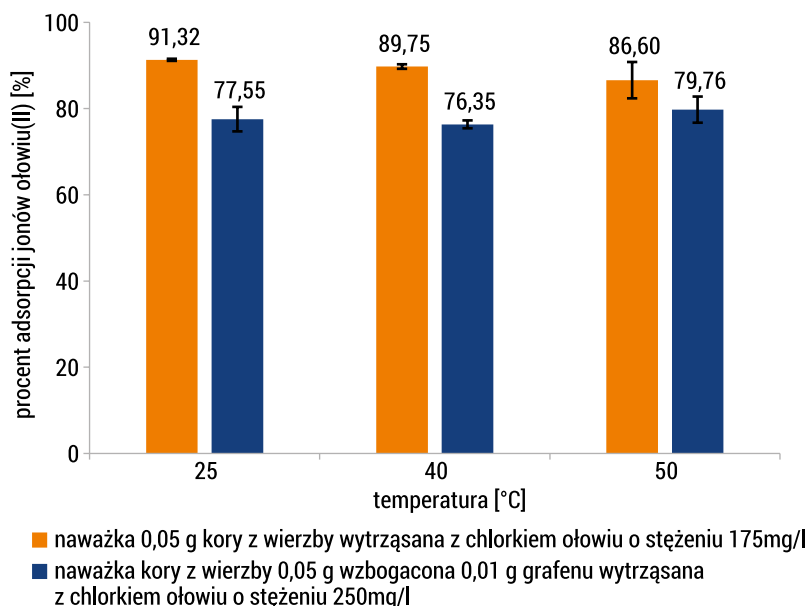


■ naważka 0,05 g kory z dębu szypułkowego wytrąsana z chlorkiem ołowiu o stężeniu 200 mg/l
 ■ naważka kory z dębu 0,05 g wzbogacona 0,01 g grafenu wytrąsana z chlorkiem ołowiu o stężeniu 200 mg/l

RYS. 3. Stopień adsorpcji jonów Pb^{2+} do kory dębowej i kory dębowej z dodatkiem grafenu

ŹRÓDŁO: oprac. własne.

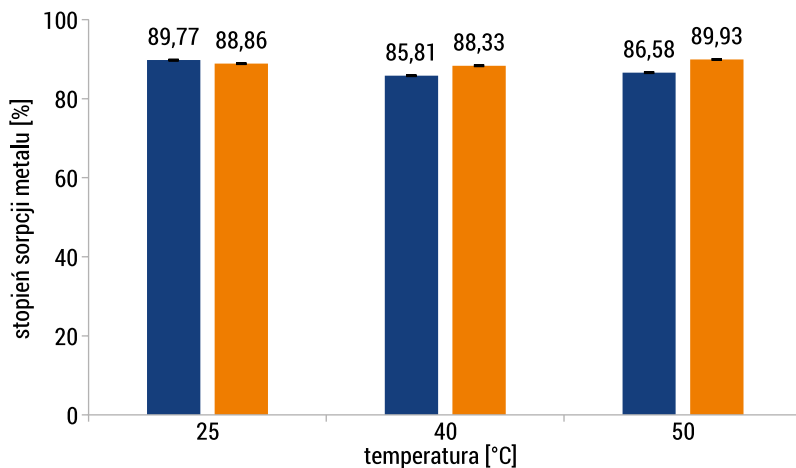
Usuwanie jonów ołowiu (II) z roztworu wodnego przy użyciu kory wierzbowej było najefektywniejsze w temperaturze 25°C, gdy jako materiał adsorpcyjny wykorzystano samą korę, natomiast w przypadku wzbogacenia jej grafenem optymalną temperaturą było 50°C (rys. 4). Kora wzbogacona grafenem jest w stanie usuwać jony ołowiu o stężeniu wyższym o 75 mg/l na podobnym poziomie co sama kora wierzbowa.



RYS. 4. Stopień adsorpcji jonów Pb^{2+} do kory dębowej i kory wierzbowej z dodatkiem grafenu

ŹRÓDŁO: oprac. własne.

Doświadczenie z usuwaniem jonów Zn^{2+} za pomocą kory dębu szypułkowego wykazało najwyższy stopień adsorpcji metalu w sorbencie wzbogaconym grafenem oraz temperaturze 50°C, który wynosił prawie 90% (rys. 5). Zbliżony wynik uzyskano też w temperaturze 25°C, bez użycia grafenu, co jest rozwiązaniem bardziej ekonomicznym, ponieważ jest on kosztowny, a brak konieczności podgrzewania oczyszczanego roztworu również pozwolił zaoszczędzić.

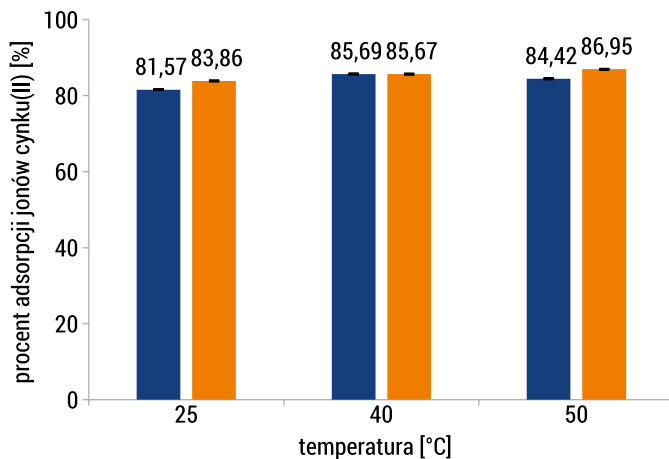


- naważka 0,05 g kory z dębu szypułkowego wytrąsana z chlorkiem cynku o stężeniu 50 mg/l
- naważka kory z dębu 0,05 g wzbogacona 0,01 g grafenu wytrąsana z chlorkiem cynku o stężeniu 50 mg/l

RYS. 5. Stopień adsorpcji jonów Zn^{2+} do kory dębowej i kory dębowej z dodatkiem grafenu

ŹRÓDŁO: oprac. własne.

Jony cynku (II) z roztworu najefektywniej usuwała badana próbka kory wierzby wytrąsana w 50°C z dodatkiem grafenu (rys. 6). Badany metal został w tym przypadku usunięty z roztworu na poziomie 87%. W temperaturze 40°C uzyskano zbliżony procent adsorpcji jonów Zn^{2+} .



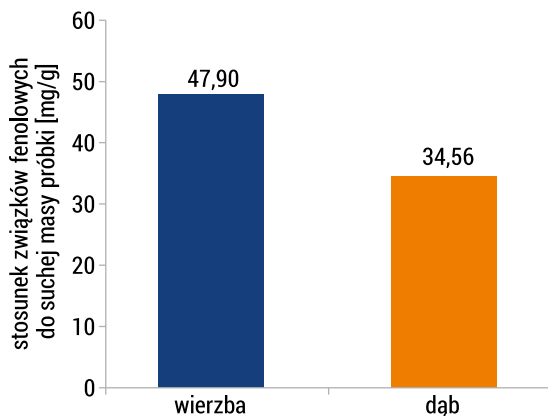
- naważka 0,05 g kory z wierzby wytrąsana z chlorkiem cynku o stężeniu 50 mg/l
- naważka 0,05 g kory z wierzby oraz dodatek 0,01 g grafenu wytrąsana z chlorkiem cynku o stężeniu 50 mg/l

RYS. 6. Stopień adsorpcji jonów Zn^{2+} do kory dębowej i kory wierzbowej z dodatkiem grafenu

ŹRÓDŁO: oprac. własne.

3.2. Oznaczenie całkowitej zawartości związków fenolowych w korze dębowej i wierzbowej

Całkowitą zawartość związków fenolowych oznaczono metodą Folina-Ciocalteu, a wyniki wyrażono w miligramach równoważnika kwasu galusowego na gram suchej masy (mg GAE/g). Analiza wykazała, że zawartość związków fenolowych w korze wierzbowej była wyższa o około 13 mg GAE/g w porównaniu z korą dębową (rys. 7).



RYS. 7. Całkowita zawartość związków fenolowych wyrażona w miligramach kwasu galusowego na gram suchej masy

ŹRÓDŁO: oprac. własne.

4. Podsumowanie

Powyższy projekt ukazał innowacyjne możliwości wykorzystania kory wierzby i dębu do usuwania jonów metali ciężkich z roztworów wodnych. W ramach badań przeprowadzono eksperymenty dotyczące sorpcji metali ciężkich, takich jak miedź, ołów i cynk, na powierzchni odpadów z przemysłu drzewnego, w tym kory wierzby i dębu. Wyniki wskazują, że tego rodzaju biomasa może stanowić atrakcyjny materiał o wysokim potencjale w zakresie oczyszczania środowiska. Co istotne, zastosowanie tlenku grafenu oraz podwyższenie temperatury w większości przypadków nie wpłynęły znacząco na poprawę właściwości sorpcyjnych substratu, a niekiedy zmiany te były wręcz niezauważalne. Z perspektywy ekonomicznej jest to korzystny wniosek, ponieważ sugeruje, że dodatkowa obróbka nie jest konieczna, podobnie jak zwiększone zużycie energii, co obniża koszty wdrożenia tego rozwiązania w praktyce.



Ministerstwo Nauki
i Szkolnictwa Wyższego

Literatura

- [1] Wolski T., Gliński J., *Organiczne odpady przemysłowe i ich przetwarzanie na użyteczne rolniczo preparaty*, „Zeszyty Problemowe Postępów Nauk Rolniczych” 1989, z. 370, s. 11–20.
- [2] Golonko A., Kalinowska M., Świsłocka R., Świdorski G., Lewandowski W., *Zastosowanie związków fenolowych i ich pochodnych w przemyśle i medycynie*, „Budownictwo i Inżynieria Środowiska” 2015, nr 6(4), s. 161–179.
- [3] Pieszko C., Zaremba A., *Zawartość związków fenolowych w ekstraktach z próbek materiału roślinnego*, „Bromatologia i Chemia Toksykologiczna” 2013, nr 46(4), s. 434–439.
- [4] Biegańska M., Cierpiszewski R., *Wykorzystanie celulozy i kory wierzby Salix americana do adsorpcji miedzi z roztworów wodnych*, „Proceedings of ECOpole” 2010, t. 4(2), s. 313–317.
- [5] Wojtkowska M., *Metale ciężkie w wodzie, osadach i roślinach Jeziora Zegrzyńskiego*, „Progress in Plant Protection” 2014, t. 51(1), s. 95–101.
- [6] Kot K., Kosik-Bogacka D., Łanocha-Arendarczyk N., Ciosek Ż., *Wpływ związków rtęci na organizm człowieka*, „Farmacja Współczesna” 2016, nr 9, s. 210–216.
- [7] Tchórzewska D., Pabis J., Kosk I., Nieć M., *Nowe zastosowania chalcodonitu jako sorbentu w procesie oczyszczania wód*, „Przegląd Geologiczny” 2001, t. 49(4), s. 303–306.
- [8] Kołodyńska D., Franus W., *Kompozyty chitozanowo-zeolitowe otrzymywane na bazie popiołów lotnych do usuwania metali ciężkich*, „Zeszyty Naukowe Instytutu Gospodarki Surowcami Mineralnymi i Energią PAN” 2016, nr 95, s. 145–155.
- [9] Tomczak E., Kamiński W., *Zastosowanie roślinnych adsorbentów naturalnych do usuwania barwników*, [w:] *Zaopatrzenie w wodę, jakość i ochrona wód*, t. 1, red. Z. Dymaczewski, J. Jeż-Walkowiak, Poznań 2012, s. 535–545.
- [10] Surmiński J., *Kora: budowa anatomiczna, skład chemiczny, możliwości wykorzystania*, Poznań 1995.
- [11] Waliszewska B., Dukiewicz H., *Wykorzystanie wierzby w farmacji*, „Zeszyty Naukowe Wydziału Nauk Ekonomicznych” 2014, nr 18, s. 58–61.
- [12] Bąk Ł., Górski J., Górka K., Szelać B., *Zawartość zawiesin i metali ciężkich w wybranych falach ścieków deszczowych w zlewni miejskiej*, „Ochrona Środowiska” 2012, t. 34, s. 49–52.
- [13] Gloaguen V., Morvan H., *Removal of Heavy Metal Ions from Aqueous Solution by Modified Barks*, „Journal of Environmental Science and Health. Part A: Environmental Science and Engineering and Toxicology” 1997, t. 32(4), s. 901–912.
- [14] Świercz A., *Wykorzystanie kory sosny zwyczajnej do oceny zanieczyszczeń pyłami cementowo-wapienniczymi w województwie świętokrzyskim*, „Sylwan” 2005, nr 149, s. 34–39.
- [15] Nahrstedt A., Schmidt M., Jäggi R., Metz J., Khayyal M.T., *Willow bark extract: the contribution of polyphenols to the overall effect*, „Wiener Medizinische Wochenschrift” 2007, t. 157, s. 348–351.

- [16] Sikora E., Łach A., Ogonowski J., *Zastosowanie ekstraktu z kory dębu pozyskanego w warunkach nadkrytycznego CO₂ jako składnika kompozycji myjących*, „Herbalism” 2016, t. 2, nr 1, s. 82–88.
- [17] Smędowski Ł., Muzyka R., *Grafen – metody otrzymywania a zastosowanie i właściwości*, „Karbo” 2013, nr 2, s. 128–136.
- [18] Janik P., *Modyfikowany tlenek grafenu w zatężaniu i oznaczaniu śladowych ilości metali ciężkich*, rozprawa doktorska, Uniwersytet Śląski, Katowice 2018.

Key words: willow bark, oak bark, sorption, biomaterial

Budowa platformy jeżdżącej z aktywnym zawieszeniem na kołach mecanum

Adrian Kosior, Michał Kumięga, Jakub Niemczycki

Koło Naukowe ROBO, Politechnika Rzeszowska

1. Wstęp

RoboLAB [1] to projekt Fundacji Wspierania Edukacji przy Stowarzyszeniu Dolina Lotnicza, z którą zbudowano pokazową platformę jeżdżącą opartą na kołach mecanum ze zdalnie regulowanym zawieszeniem. Ma ona służyć za model dla aktualnych i przyszłych uczestników konkurencji Task Hunters na Międzynarodowych Zawodach Robotycznych XChallenge. Ten eksponat jest przedstawiany przez animatorów Fundacji na licznych wydarzeniach oraz jako materiał dla uczniów uczących się budować roboty Task Hunters w ramach szkoleń prowadzonych przez RoboLAB.

2. Konstrukcja i mechanika

Łazik kategorii Task Hunters zaprojektowano w zaawansowanym środowisku Autodesk Fusion 360. Program ten umożliwił precyzyjne modelowanie z uwzględnieniem tolerancji elementów, co było kluczowe dla zapewnienia wysokiej dokładności wykonania. Dzięki temu możliwe były stworzenie realistycznej wizualizacji konstrukcyjnej całego robota i weryfikacja projektu jeszcze przed przystąpieniem do procesu składania.

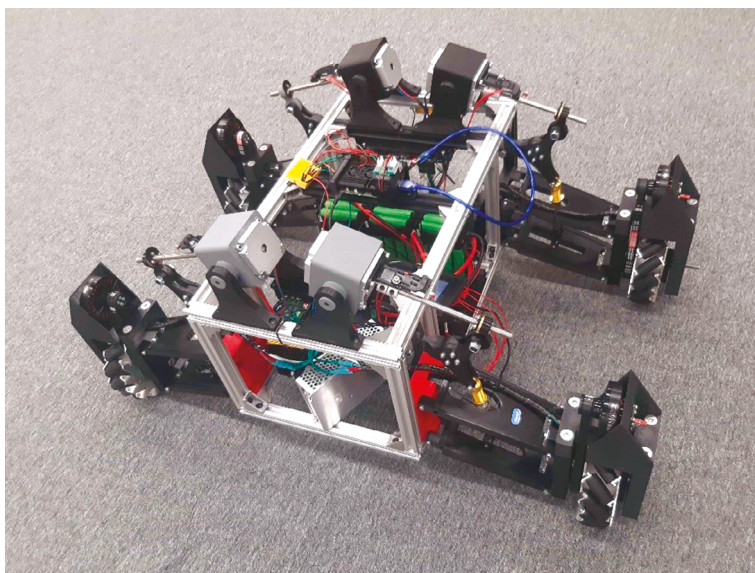
Podstawową strukturę łazika stanowią profile aluminiowe typu v-slot. Ten system umożliwia łatwe łączenie poszczególnych elementów oraz potencjalną rozbudowę łazika w przyszłości, bez konieczności ingerencji w istniejącą konstrukcję.

W projekcie zastosowano również technologię druku 3D w standardzie FFF (*Fused Filament Fabrication*), szeroko wykorzystywaną w prototypowaniu. Pozwoliła ona na wykonanie kluczowych komponentów, takich jak mocowania zawieszenia do ramy, jego elementy przy amortyzatorach oraz obudowy kół mieszczące silniki napędowe. We wczesnych fazach konstrukcji użyto różnych rodzajów filamentów, ustawień i orientacji przy drukowaniu części w celu późniejszego testowania ich wytrzymałości. Skupiono się w szczególności na elementach montażowych do kół i silników,

które były najbardziej podatne na zderzenia. Szybko okazało się, że niezależnie od ustawień PETG nie był w stanie wytrzymać zderzeń. PCTG i ABS były bardzo zbliżone, ale przy drukowaniu w odpowiedniej orientacji ABS jest wytrzymalszy.

Aby zwiększyć wytrzymałość elementów szczególnie narażonych na obciążenia, w ich wnętrzach umieszczono wzmocnienia z włókna węglowego w formie rurek. Takie rozwiązanie zapewniło optymalną sztywność przy jednoczesnym zachowaniu niskiej wagi konstrukcji.

Projekt jest przykładem efektywnego wykorzystania nowoczesnych technologii CAD oraz druku 3D, łączy innowacyjne podejście do projektowania z praktycznością konstrukcji mechanicznej.



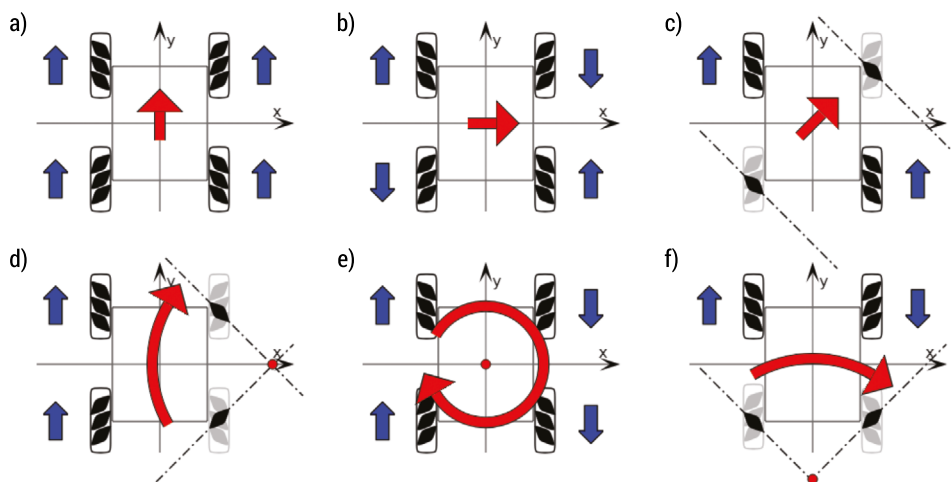
FOT. 1. Konstrukcja robota typu Task Hunters

ŹRÓDŁO: oprac. własne.

Inspiracją dla projektu modułowego zawieszenia łazika Task Hunters były klasyczne „śruby rzymskie”. Rozwiązanie to pozwala na dynamiczną regulację położenia punktów mocowania amortyzatorów, co przekłada się na precyzyjną kontrolę wysokości zawieszenia. Centralnym elementem systemu jest silnik krokowy, który umieszczono w specjalnie zaprojektowanej i wydrukowanej w technologii 3D kołysce. Umożliwia ona swobodne przechylanie się silnika, a jednocześnie zapewnia stabilne zamocowanie na szczycie ramy konstrukcyjnej.

Do silnika przymocowana jest śruba trapezowa. Obracając się, przesuwa punkt mocowania amortyzatora wzdłuż swojej osi – bliżej lub dalej względem ramy. Taki mechanizm umożliwia podnoszenie i opuszczanie zawieszenia, dostosowując jego charakterystykę do zmieniającego się terenu. Rozwiązanie to oferuje wysoki poziom adaptacyjności, co jest kluczowe w zadaniach eksploracyjnych.

Koła łazika to zaawansowane modele typu mecanum, które wprowadzają zupełnie nową jakość w poruszaniu się pojazdu. Dzięki ich unikatowej konstrukcji łożnik zyskuje zdolność do poruszania się w dowolnym kierunku, w tym na osiach ukośnych oraz wykonywania takich manewrów jak obrót w miejscu czy ruch boczny. Taka wszechstronność jest szczególnie przydatna podczas pokonywania trudnych przeszkód terenowych czy w precyzyjnych manewrach, co czyni te koła idealnym wyborem do modelu pokazowego typu Task Hunters.



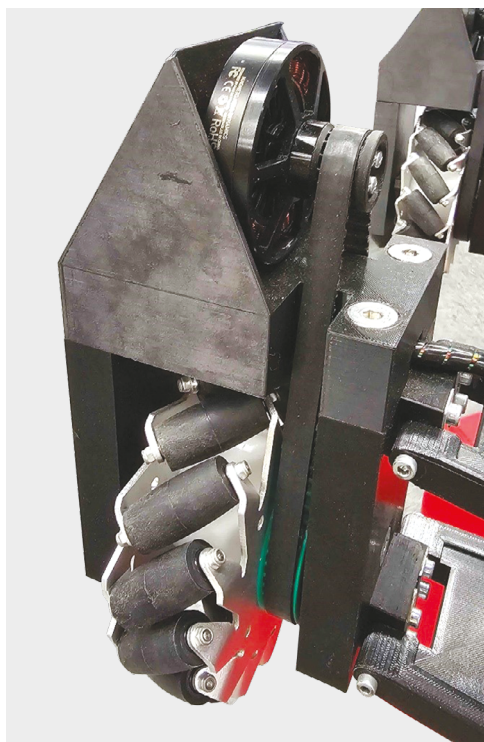
RYS. 1. Ruch przy użyciu kół mecanum

ŹRÓDŁO: Wikimedia Commons.

Napęd kół oparty jest na silnikach bezszczotkowych, zwykle stosowanych w dronach. Są one lekkie, wydajne i mają wystarczającą moc, aby zapewnić łożnikowi optymalną zwrotność oraz ciąg. Silniki te w połączeniu z kołami mecanum i regulowanym zawieszeniem stanowią doskonały przykład synergii nowoczesnych technologii, pozwalając łożnikowi Task Hunters na realizację zaawansowanych zadań eksploracyjnych w różnych warunkach terenowych.

Silniki zostały umieszczone bezpośrednio nad kołami mecanum. Taki układ nie tylko zoptymalizował rozkład masy, lecz także pozwolił na znaczne zmniejszenie szerokości całej konstrukcji, co umożliwia łatwe poruszanie się pojazdu w wąskich przestrzeniach, takich jak standardowe drzwi między pomieszczeniami.

Moment obrotowy z silników na koła jest przenoszony za pomocą pasków zębatych. Kluczowym elementem tego układu są specjalnie zaprojektowane i wydrukowane w technologii 3D koła zębate. Ich precyzyjnie obliczone przełożenie zapewnia efektywne przekazywanie napędu oraz optymalną wydajność pracy mechanizmu. Zastosowanie pasków zębatych pozwala również na płynne działanie całego układu, dzięki czemu minimalizuje straty energii i hałas, co jest istotne dla efektywności pracy łożnika.



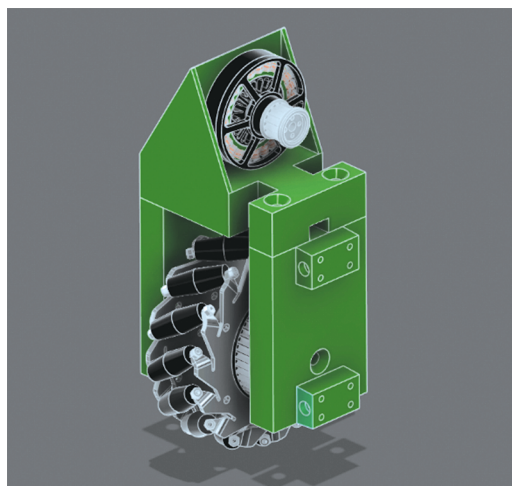
FOT. 2. Pasek przenoszący moment obrotowy

ŹRÓDŁO: oprac. własne.

Obudowa systemu napędowego została zaprojektowana z naciskiem na funkcjonalność i łatwą obsługę serwisową. Konstrukcja umożliwia szybką wymianę kół, co jest szczególnie ważne w kontekście dostosowywania pojazdu do różnych warunków terenowych. Demontaż kół wymaga jedynie odkręcenia kilku śrub, które pełnią jednocześnie kilka kluczowych funkcji: usztywniają elementy obudowy, pozwalają na napinanie paska zębatego oraz utrzymują moment przejścia napędu z silnika na koło.

Proces wymiany jest możliwie prosty i intuicyjny: po odkręceniu odpowiednich śrub operator ma szybki dostęp do elementów umożliwiających zamocowanie nowego zestawu kół, przygotowanego wcześniej do pracy w określonych warunkach. Modułowa budowa pozwala na łatwe dostosowanie łożyska do różnorodnych wyzwań – od płaskich powierzchni wewnętrznych po nierówne, wymagające tereny zewnętrzne.

Takie rozwiązanie zapewnia nie tylko dużą wszechstronność, lecz także zwiększa trwałość i niezawodność łożyska. Dzięki przemyślanemu systemowi napędowemu i modułowej konstrukcji Task Hunter jest w pełni przygotowany do realizacji zadań wymagających elastyczności, precyzji i dostosowania do zmieniających się warunków operacyjnych.



RYS. 2. Model pojedynczego koła

ŹRÓDŁO: oprac. własne.

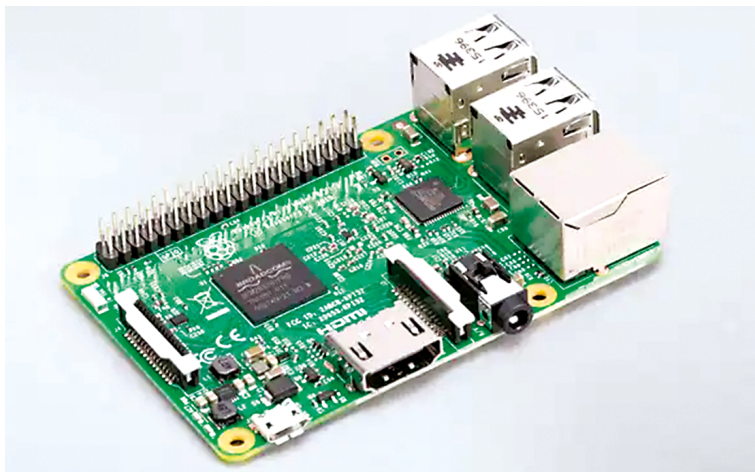
3. Elektronika

Głównym założeniem podczas tworzenia części elektronicznej robota było stworzenie niezawodnej i elastycznej architektury, która pozwoli na integrację kluczowych komponentów mechanicznych oraz realizację zaawansowanych algorytmów sterowania. Elektronika odgrywa kluczową rolę, zapewniając komunikację między jednostką centralną, modułami sterującymi oraz systemem zasilania.

Sercem systemu sterowania robota Th jest komputer jednopłytkowy Raspberry Pi 3, który został wybrany ze względu na wysoką wydajność, elastyczność oraz kompatybilność z szeroką gamą urządzeń peryferyjnych. Wyposażony w czterordzeniowy procesor ARM Cortex-A53 oraz 1 GB pamięci RAM zapewnia wystarczającą moc obliczeniową do przetwarzania złożonych algorytmów sterowania i komunikacji w czasie rzeczywistym. Zintegrowane moduły łączności bezprzewodowej (Wi-Fi i Bluetooth) umożliwiają zdalne monitorowanie pracy robota oraz przesyłanie danych, co zwiększa możliwości aplikacyjne konstrukcji.

Jednostka centralna obsługuje wiele interfejsów komunikacyjnych, takich jak I2C, SPI oraz UART, co pozwala na łatwą integrację z układami peryferyjnymi. W projekcie wykorzystano magistralę CAN, która łączy Raspberry Pi z modułami sterowania napędami. Została ona wybrana ze względu na swoją niezawodność oraz odporność na zakłócenia elektromagnetyczne, co ma kluczowe znaczenie w środowiskach, gdzie równocześnie operuje wiele urządzeń elektronicznych. Do komunikacji poprzez CAN wykorzystuje się moduł MKS CANable. Poprzez podpięcie go do Raspberry Pi jesteśmy

w stanie wysyłać sygnały CAN z dedykowanego urządzenia USB, bez potrzeby konwertowania innego protokołu komunikacyjnego, co ułatwia pracę i minimalizuje liczbę punktów awarii.



FOT. 3. Raspberry Pi 3

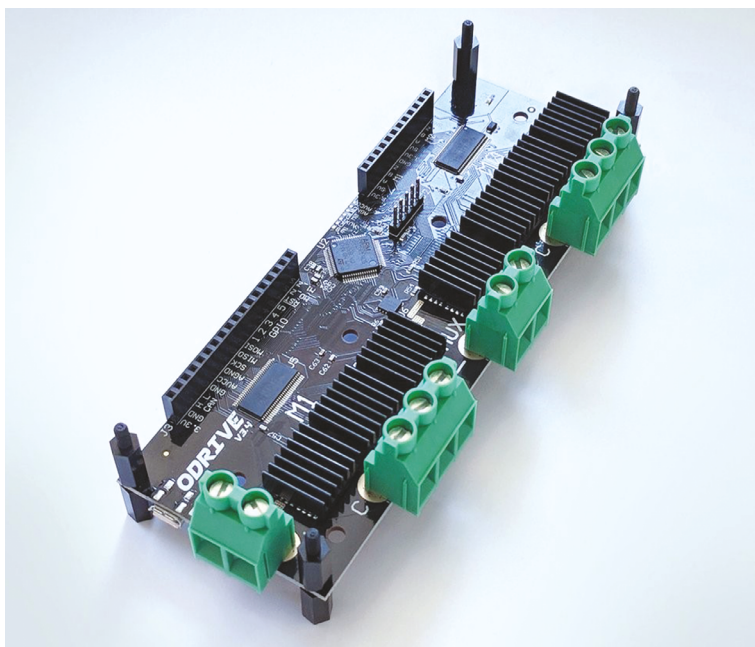
ŹRÓDŁO: [2].

Raspberry Pi 3 jest zasilane napięciem 5 V, które dostarczane jest za pośrednictwem przetwornicy step-down obniżającej napięcie dostarczone z baterii. Taki sposób zasilania zapewnia jednostce centralnej stabilną pracę, niezależnie od fluktuacji napięcia w głównym systemie zasilania, co minimalizuje ryzyko nieprzewidzianych zakłóceń w funkcjonowaniu układu.

W robocie zastosowano bezszczotkowe silniki prądu stałego MAD M6C10 EEE, które cechują się wysoką sprawnością energetyczną, trwałością oraz precyzją działania. Dzięki ich dużej mocy robot jest w stanie osiągać duże prędkości, co pozwala na dynamiczne przemieszczanie się robota, nawet w wymagających warunkach terenowych. Silniki są sprzężone z enkoderami magnetycznymi, które umożliwiają dokładną kontrolę pozycji oraz prędkości obrotowej.

Za sterowanie silnikami odpowiadają dwa sterowniki ODrive 3.6, które zostały zaprojektowane z myślą o pracy w środowiskach wymagających dużej precyzji. Wykorzystują one algorytm sterowania wektorowego (FOC – *Field-Oriented Control*), który zapewnia płynność oraz stabilność pracy napędów w szerokim zakresie prędkości. Sterowniki te komunikują się z Raspberry Pi za pomocą magistrali CAN, co pozwala na szybką wymianę danych w czasie rzeczywistym.

Sterowniki ODrive oferują szereg zalet, w tym możliwość integracji z enkoderami oraz obsługę napięć do 56 V, co czyni je idealnym rozwiązaniem dla robotyki mobilnej. Dzięki swojej konstrukcji umożliwiają sterowanie momentem obrotowym, prędkością oraz pozycją kątową silników, co pozwala na pełne wykorzystanie możliwości kół mekano.



FOT. 4. Sterownik silników BLDC ODrive

ŹRÓDŁO: [3].

Do podnoszenia i obniżenia aktywnego zawieszenia robota używamy czterech silników krokowych, po jednym na każde koło, których budowa pozwala na o wiele dokładniejsze kontrolowanie zawieszenia. W opracowanym przez nas systemie sterowania pilot może jednocześnie sterować wszystkimi silnikami bądź kontrolować każdy pojedynczo. Daje mu to możliwość zarówno szybkiego zmieniania wysokości zawieszenia, np. dla polepszenia stabilności przy dużej prędkości, jak i dokładnego sterowania każdym kołem w trudnym terenie.

4. Zasilanie

Źródłem energii robota są baterie litowo-jonowe o napięciu nominalnym 3,6 V i pojemności 2500 mAh, rozmieszczone w dwunastu koszyczkach, z których każdy zawiera po trzy baterie. Koszyczki zostały połączone szeregowo w konfiguracji 12S3P. Takie rozwiązanie łączy łatwą wymianę ogniw, długi czas wydajności i duże maksymalne natężenie prądu.

Bezpieczeństwo pracy ogniw jest zapewnione przez układ zarządzania bateriami (BMS), skonfigurowany w trybie 12S, który monitoruje parametry pracy akumulatorów, takie jak napięcie, prąd ładowania oraz temperaturę. Dzięki domontowaniu do niego ekranu możemy w czasie rzeczywistym monitorować stan baterii

oraz pobierany prąd. BMS chroni baterie przed przegrzaniem, przeciążeniem oraz nadmiernym rozładowaniem, co wydłuża ich żywotność, zwiększa też niezawodność całego systemu.

Poza bezpieczeństwem BMS oferuje również ułatwienie użytkowania. Pomimo tego, że bateria składa się z osobnych akumulatorów litowo-jonowych, nie muszą być one ładowane wszystkie osobno, ponieważ BMS pozwala na ładowanie wszystkich baterii z balansowaniem poprzez podłączenie ładowarki akumulatorów litowo-jonowych 12S.

Raspberry Pi oraz pozostałe układy wymagające niższych napięć są zasilane za pośrednictwem przetwornicy, która redukuje napięcie z głównego źródła zasilania. Taka architektura minimalizuje zakłócenia elektromagnetyczne oraz zapewnia stabilne warunki pracy wszystkim modułom elektronicznym.

5. Sterowanie

Sterowanie robotem odbywa się za pomocą aparatury FrSky X9D. Dzięki licznym przełącznikom, zarówno analogowym, jak i cyfrowym, możliwe było stworzenie schematu kontroli, który zarazem pozwala nie tylko na wykorzystanie pełnego potencjału robota, lecz także na minimalne zmiany przy wymianie modułów. Przy uruchomieniu platformy jeżdżącej aparatura nie jest w stanie natychmiastowo kontrolować robota, należy najpierw przejść procedurę uzbrajania. Polega ona na wyzerowaniu drążków odpowiedzialnych za ruch robota i ustawienie wszystkich przełączników w ich stany domyślne. Procedura ta zapewnia bezpieczeństwo użytkownikom poprzez zapobieganie przypadkowemu ruszeniu robota.

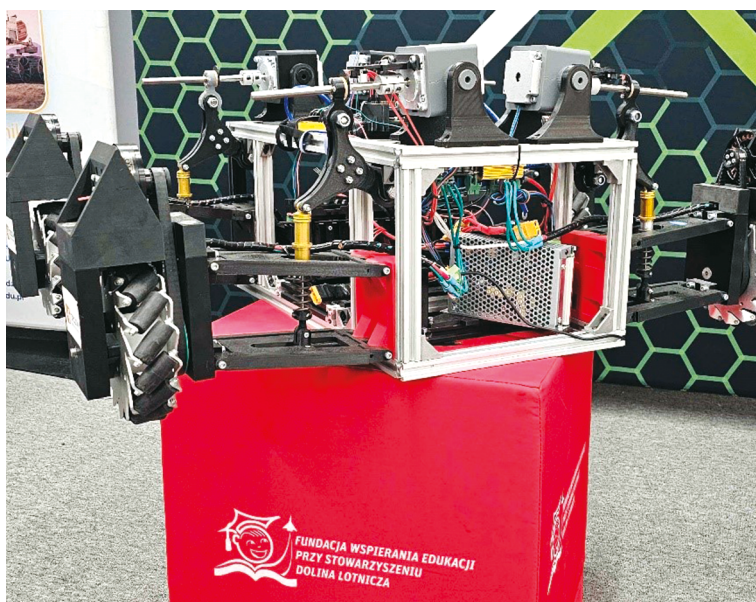
Aparatura daje pełną swobodę w konfigurowaniu profili sterowania, dzięki czemu możemy dowolnie dostosowywać kontrolę zależnie od potrzeb. Możemy też zapisywać wiele profili, co pozwala na przygotowanie konfiguracji do wielu modułów, które mogą się różnić pomiędzy sobą krzywymi sterowania, przeznaczeniem przycisków czy nawet używanymi kanałami.

Jeden z drążków nadajnika kontroluje ruch robota, a drugi jest przeznaczony do kontrolowania wysokości zawieszenia lub sterowania dodatkowym modułem, zależnie od stanu przełącznika. Za pomocą innego przełącznika, trzeciego pozycyjnego, pilot ustawia aktualną maksymalną prędkość. Pozwala to zarówno na szybkie poruszanie się, jak i precyzyjne ruchy, które w konkurencji Task Hunters są kluczowe.

Odbiornik komunikuje się poprzez SBUS, przez co bezpośrednie połączenie z Raspberry Pi nie jest możliwe i należy zastosować konwerter. SBUS daje możliwość użycia wszystkich kanałów nadajnika, co nie byłoby możliwe przy wykorzystaniu wyjść PWM, które są alternatywną formą komunikacji z odbiornikiem. Są one łatwiejsze w obsłudze, ale mniejsza liczba kanałów uniemożliwiłaby stworzenie pełnego systemu sterowania.

6. Podsumowanie

Robot pokazowy typu Task Hunters był wielkim sukcesem Koła Naukowego ROBO. Przy ograniczonej mocy był w stanie osiągać prędkość prawie 20 km/h, system sterowania był bardzo stabilny i dawał pilotowi pełną kontrolę. Zgodnie z założeniami na przykładzie robota uczą się uczniowie budujący własne roboty do kategorii Task Hunters, służy on także jako eksponat na wielu wydarzeniach Fundacji, w szczególności na Międzynarodowych Zawodach Robotów XChallenge czy podczas otwarcia RoboSTREFY – Misji Inżynier.



FOT. 5. Robot typu Task Hunters

ŹRÓDŁO: oprac. własne.

Literatura

- [1] Fundacja Wspierania Edukacji przy Stowarzyszeniu Dolina Lotnicza, RoboLAB Local STEM Incubator, robolab.edu.pl.
- [2] raspberrypi.com/products/raspberry-pi-3-model-b [dostęp: 26.05.2025].
- [3] odriverobotics.com/shop/odrive-v36 [dostęp: 26.05.2025].

Key words: robotics, automation, electronics, mechanics, mechatronics

Zwiększenie funkcjonalności robota współpracującego z wykorzystaniem metod wizyjnych i metod sterowania głosowego

*Szymon Kotwica, Andrzej Chmielowiec, Karol Łysiak
Koło Naukowe Informatyki Przemysłowej, Politechnika Rzeszowska*

1. Wstęp

Współczesne automatyzacje i produkcje przemysłowe coraz częściej służą do usprawniania procesów, które nie mają charakteru seryjnego. Rosnąca popularność robotów współpracujących sprawia, że przedsiębiorstwa coraz uważniej przyglądają się możliwości ich zastosowania w procesach zarezerwowanych do tej pory wyłącznie dla ludzi. Dodatkowym motywem działania w tym obszarze jest błyskawiczny rozwój metod opartych na sztucznej inteligencji, które dają nadzieję na tworzenie narzędzi modyfikujących oprogramowanie robota w sposób automatyczny, a nawet sterujących jego ruchami praktycznie w trybie rzeczywistym. W niniejszym artykule podjęto dwa zagadnienia związane z usprawnieniem pracy robota współpracującego. Pierwszym z nich jest automatyczne rozpoznawanie kształtów za pomocą systemu wizyjnego, drugim zaś konwersja poleceń głosowych wydawanych przez operatora na konkretne zachowania robota.

Oba tematy są bardzo wyraźnie obecne w literaturze naukowej. Na przykład Kohut i Skop [1] wykorzystują język Python i bibliotekę OpenCV do opracowania rozwiązań wspierających system kontroli jakości. Z kolei Zaki i inni [2] posługują się systemem wizyjnym połączonym z biblioteką OpenCV do detekcji nadjeżdżających produktów i odpowiedniego ich kolejkowania. Jego zadaniem jest optymalizacja przepływu produktów, która pozwala minimalizować czas przestoju wynikający z oczekiwania na produkty danego typu. Bardzo zaawansowany system podnoszący funkcjonalność robota współpracującego proponują Mendez i inni [3]. Analizują możliwość jego wykorzystania oraz rozpoznawania głosu do: klasyfikacji obiektów i przechowywania elementów montażowych, klasyfikacji poleceń głosowych oraz śledzenia gestów dłoni. Ciekawe podejście proponują Zürn i inni [4], którzy używają robota wraz z systemem wizyjnym do automatycznego wytworzenia etykietowanych obrazów w celu wygenerowania odpowiedniej liczby danych do systemu głębokiego uczenia maszynowego. W artykule Ionescu i Schlunda [5] można zaś zapoznać się z propozycją

systemu programowania robotów współpracujących przy użyciu komend głosowych. Natomiast El Zaatari i inni [6] przedstawiają przegląd innowacyjnych metod wspierających możliwości programowania robotów współpracujących na potrzeby przemysłu ze szczególnym uwzględnieniem narzędzi wizyjnych i rozpoznawania komunikatów dźwiękowych.

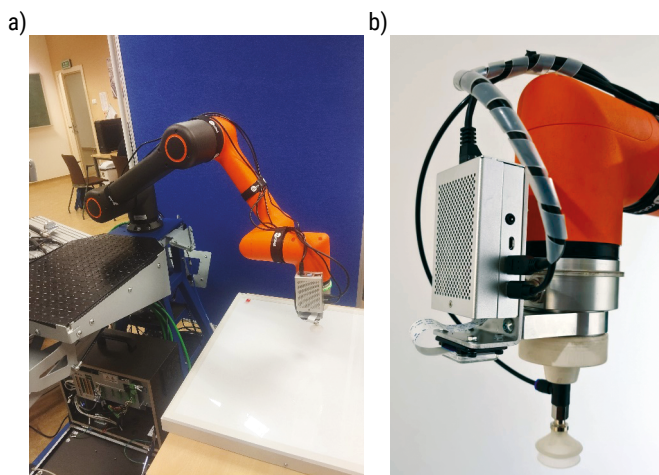
Prezentowane w tym artykule wyniki skupiają się na wykorzystaniu zarówno biblioteki OpenCV do wsparcia narzędzi programistycznych w projektowaniu trajektorii ruchu robota, jak i aplikacji mobilnych jako narzędzia umożliwiającego komunikację głosową z robotem współpracującym. W prezentowanej pracy skorzystano z narzędzi opracowanych przez Chmielowca i innych [7] oraz metod przedstawionych w książce Howse'a [8].

2. Materiały i metody

Środowisko do badań stworzono, wykorzystując robota współpracującego HCR5. Jest to urządzenie koreańskiej firmy Hanwha, które wyposażone zostało w wygodny i intuicyjny interfejs użytkownika. Programowanie robota odbywa się w trybie okienkowym lub z poziomu skryptów opartych na składni języka JavaScript. Producent umożliwił komunikację z robotem m.in. za pomocą takich interfejsów, jak port szeregowy i protokół TCP/IP. Na potrzeby badań posłużono się tym drugim, gdyż daje on bardzo szerokie możliwości łączenia środowiska robota z aplikacjami do zbierania i przetwarzania danych. Zapewnia to dużą elastyczność w realizacji połączenia z systemem sterującym robota za pomocą minikomputerów i urządzeń mobilnych.

Robot HCR5 ma 6 osi, masę własną 21 kg, udźwig 5 kg i zasięg 915 mm. Ruchy wykonuje z typową prędkością wynoszącą 1 m/s, a ich powtarzalność jest na poziomie $\pm 0,05$ mm. Na fot. 1a) przedstawiono kompletny widok stanowiska roboczego, a na fot. 1b) zbliżenie systemu wizyjnego umieszczonego bezpośrednio przy kiści robota. Opracowano oprogramowanie robota, które korzystając z interfejsu gniazd i protokołu TCP/IP, łączyło się z serwerem zaimplementowanym w języku Python z wykorzystaniem biblioteki *socket*. Robot działał zatem w trybie klienta, który odpytywał serwer, czy przekazane zostały mu nowe instrukcje sterujące. Dodatkowo w trybie klienta podłączono do serwera system wizyjny wykonany z użyciem platformy Raspberry Pi oraz system przetwarzania komend głosowych zaimplementowany w środowisku Android Studio i umieszczony na urządzeniu mobilnym. Istotnym elementem systemu wizyjnego jest podświetlany stół roboczy, który pozwala na uzyskanie obrazów bezcieniowych i gwarantuje znacznie lepsze rozpoznawanie kształtów niż w przypadku zdjęć wykonywanych przy tradycyjnym oświetleniu. Przyjęte rozwiązanie jest wygodne i elastyczne, ale należy pamiętać, że jego implementacja w warunkach produkcyjnych wymaga zorganizowania dedykowanej sieci, w której serwer i jego klienci będą mieli gwarancję realizacji transmisji

w czasie rzeczywistym. Nie można bowiem dopuścić do sytuacji, w której polecenia kierowane do robota napotykają problem odpowiednio szybkiego przesłania ich za pomocą protokołu TCP/IP.



FOT. 1. Stanowisko zrobotyzowane: a) widok całościowy, b) zbliżenie na system wizyjny. Na widoku całościowym wyszczególniono: system wizyjny (A), system sterowania robota (B) i podświetlany stół roboczy (C)

ŹRÓDŁO: oprac. własne.

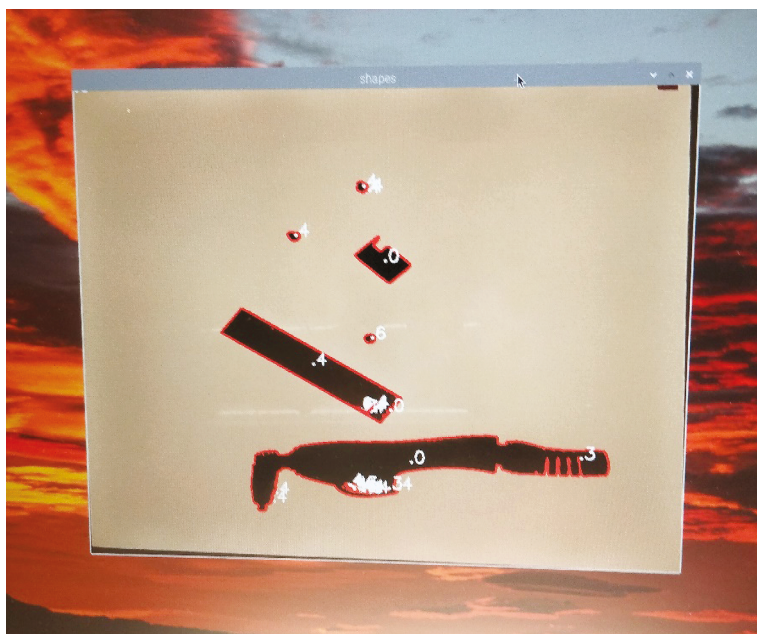
System wizyjny został napisany w języku Python i zaimplementowany na mikrokomputerze Raspberry Pi 4 z zamontowaną kamerą. Jego zasadniczym zadaniem jest rozpoznanie płaszczyzny, na której znajdują się interesujące nas obiekty. System wykorzystuje bibliotekę OpenCV, która oferuje zestaw funkcji do operacji na obrazach, takich jak: konwersje kolorów, segmentacja, transformacje geometryczne, detekcja krawędzi oraz ich cechowanie. Działanie modułu wizyjnego polega na lokalizacji interesującego nas obiektu na zdjęciu i odczytaniu jego współrzędnych na obrazie (pikseli). Następnie wartości te są konwertowane na rzeczywiste współrzędne robota za pomocą transformacji afinicznej. Jej postać zależy od względnego położenia stołu roboczego i początku układu współrzędnych robota, który znajduje się w jego podstawie. System zakłada, że stół roboczy znajduje się na ustalonej wysokości Z, a wszystkie analizowane obiekty są na tyle płaskie, że podczas ruchu robota ich wysokość może być pominięta. Należy też zaznaczyć, że w celu uzyskania odpowiedniego poziomu ostrości obrazów zastosowano stół roboczy z podświetleniem LED, które eliminuje cienie wokół obiektów.

Obsługa komend głosowych została zorganizowana przy użyciu platformy Google Android. Do opracowania aplikacji wykorzystano zintegrowane środowisko programistyczne Android Studio, które oferuje szereg funkcji ułatwiających programowanie, testowanie, projektowanie oraz debugowanie aplikacji mobilnych. Podczas pisania aplikacji użyto biblioteki Google Speech-to-Text. Umożliwia ona rozpoznawanie

mowy i konwertowanie jej na tekst. Jej działanie opiera się na algorytmach uczenia maszynowego, które pozwala na dokładne przetwarzanie mowy w czasie rzeczywistym. Po zainstalowaniu aplikacji na urządzeniu mobilnym i przyznaniu niezbędnych uprawnień zmienia ona głos na tekst w formacie UTF-8. Następnie wysyła tak przygotowaną komendę na serwer, na którym jest kolejkowana i oczekuje na odbiór przez system sterowania robotem.

3. Wyniki

System wizyjny zamontowany został na kiści robota i ustawiony nad podświetlanym stołem, na którym znajdują się różne obiekty. System wykonuje zdjęcie i lokalizuje obiekty, co zaprezentowano na fot. 2. Wykrywanie kształtów i ich geometrycznych środków odbywa się przy wykorzystaniu odpowiednich funkcji OpenCV. Wyznaczone w ten sposób geometryczne środki zlokalizowanych obiektów są transformowane za pomocą przekształcenia afinicznego na rzeczywiste współrzędne robota. Korzystając z tych informacji, system wizyjny może wysłać instrukcję sterującą, która polega na przesunięciu ramienia robota nad wybrany obiekt, podniesieniu go i odstawieniu w określone wcześniej miejsce (fot. 3). Należy zaznaczyć, że system wyznacza jedynie współrzędne X, Y obiektów i może pracować tylko z elementami płaskimi.



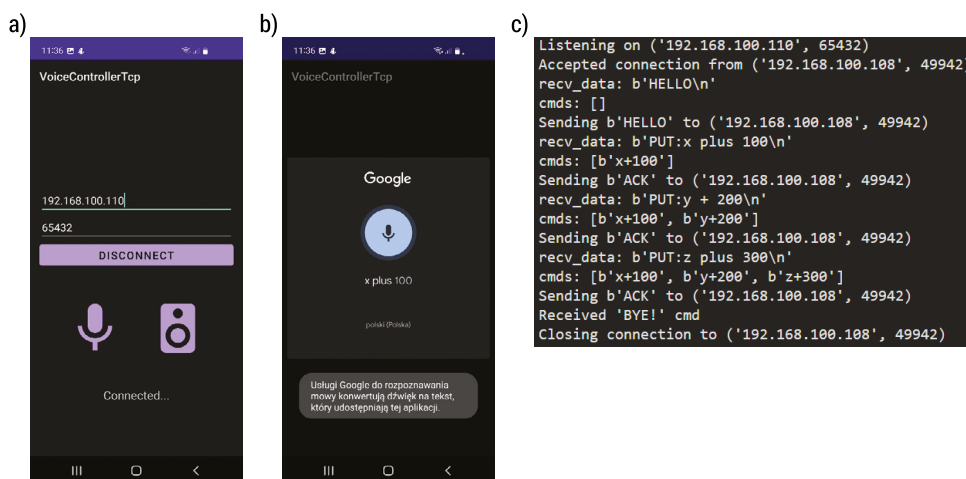
FOT. 2. Wykrycie obiektów przez system wizyjny

ŹRÓDŁO: oprac. własne.



FOT. 3. Robot umieszczający chwytak bezpośrednio nad środkiem jednego z wykrytych obiektów
 ŹRÓDŁO: oprac. własne.

W przypadku włączonego podświetlenia stołu zniwelowano do zera pojawiające się wokół obiektów cienie, co dało możliwość dokładnego zinterpretowania zdjęcia oraz precyzyjnego wyznaczenia współrzędnych rzeczywistych. W przypadku braku podświetlenia obiekty rzucały cień, który był przyczyną modyfikacji ich kształtu i błędnego wyznaczenia ich środka. Błędy w wyznaczaniu współrzędnych były na tyle duże, że uniemożliwiały prawidłowe chwyty zlokalizowanych obiektów. Wprowadzenie podświetlania stołu znacznie poprawiło precyzję wyznaczania współrzędnych i znacząco przyczyniło się do prawidłowej pracy robota.



FOT. 4. System sterowania głosem: a) widok ekranu w urządzeniu mobilnym, b) translacja komend głosowych na tekst, c) wydruki serwera informujące o otrzymaniu i wstawieniu do kolejki kolejnych komend głosowych

ŹRÓDŁO: oprac. własne.

System wydawania komend głosowych stworzony przy pomocy Android Studio i biblioteki Google Speech-To-Text pozwolił na zamianę głosu na tekst komendy przeznaczonej dla robota. Aplikacja uruchomiona na urządzeniu mobilnym rejestruje głos operatora i zamienia sygnał audio na ciąg znaków. Następnie system analizuje uzyskany tekst i formatuje go do postaci przewidzianej przez system sterowania robotem. Na przykład słowa „plus”, „dodaj”, „zwiększ” zamieniane są na znak „+”, słowa „minus”, „odejmij”, „zmniejsz” zamieniane są na znak „-”. Dzięki temu system sterowania dostaje polecenie bardzo proste w konstrukcji i łatwe do analizy.

4. Podsumowanie

Współczesne automatyzacja i robotyzacja procesów przemysłowych odgrywają kluczową rolę w dynamicznie zmieniającym się przemyśle. Coraz częściej skoncentrowane są na usprawnianiu procesów, które nie są częścią typowej produkcji seryjnej. Szczególne miejsce zajmują roboty współpracujące (tzw. coboty), które przez swoją konstrukcję i zaawansowane funkcje kontroli mogą bezpiecznie współpracować zarówno z człowiekiem, jak i innym robotem. Ich popularność wzrasta z każdym rokiem, a ich zastosowanie w kolejnych obszarach funkcjonowania przedsiębiorstwa staje się możliwe dzięki postępowi technologicznemu.

W pracy omówiono dwa zagadnienia mające na celu usprawnienie procesu programowania robotów współpracujących. Pierwsze dotyczy automatycznego rozpoznawania obiektów przy użyciu systemu wizyjnego, co umożliwia ramieniu bardziej precyzyjną interakcję z otoczeniem oraz zwiększa jego zdolność adaptacyjną do środowiska, w jakim się znajduje. Drugie zagadnienie skupia się na konwersji komend głosowych wydawanych przez operatora robota na konkretne instrukcje powodujące ruch robota. Tego rodzaju rozwiązanie pozwala na uproszczoną interakcję robot–człowiek, czyniąc proces obsługi bardziej intuicyjnym.

W zaprezentowanych badaniach skoncentrowano się na dwóch najbardziej praktycznych aspektach wykorzystania robotów współpracujących: zastosowaniu biblioteki OpenCV do oszacowania trajektorii ruchu ramienia oraz użyciu aplikacji mobilnych służących jako platforma do komunikacji głosowej i tekstowej z robotem. Dzięki bibliotece OpenCV ramię robota jest w stanie precyzyjnie identyfikować, jak i manipulować obiektami, a to z kolei pozwala na skuteczniejsze wykonywanie zadań, takich jak sortowanie, pakowanie czy montaż. Zdolność do interpretacji wizualnej zwiększa potencjał robotów w środowiskach cechujących się różnorodnością prac, w których nieregularność obiektów stanowi problem dla tradycyjnych systemów automatyzacji.

Literatura

- [1] Kohut P., Skop K., *Vision Systems for a UR5 Cobot on a Quality Control Robotic Station*, „Applied Sciences” 2024, nr 14(20), 9469, <https://doi.org/10.3390/app14209469>.
- [2] Zaki A.M.A., Fathy A.M.M., Carnevale M., Giberti H., *Application of Realtime Robotics platform to execute unstructured industrial tasks involving industrial robots, cobots, and human operators*, „Procedia Computer Science” 2024, t. 200, s. 1359–1367, <https://doi.org/10.1016/j.procs.2022.01.337>.
- [3] Mendez E., Ochoa O., Olivera-Guzman D., Soto-Herrera V.H., Luna-Sánchez J.A., Lucas-Dophe C., Lugo-del-Real E., Ayala-Garcia I.N., Alvarado Perez M., González A., *Integration of Deep Learning and Collaborative Robot for Assembly Tasks*, „Applied Sciences” 2024, nr 14(2), 839, <https://doi.org/10.3390/app14020839>.
- [4] Zürn M., Dzubba M., Reiff C., Ajdinović S., Lechler A., Verl, A., *Cobot for Automated Vision Data: Streamlining Production with Automated Annotations for Machine Learning*, [w:] *2024 International Conference on Artificial Intelligence, Computer, Data Sciences and Applications (ACDSA)*, 2024, s. 1–6, <https://doi.org/10.1109/ACDSA59508.2024.10468034>.
- [5] Ionescu T.B., Schlund S., *Programming cobots by voice: A human-centered, web-based approach*, „Procedia CIRP” 2021, t. 97, s. 123–129, <https://doi.org/10.1016/j.procir.2020.05.213>.
- [6] El Zaatari S., Marei M., Li W., Usman Z., *Cobot programming for collaborative industrial tasks: An overview*, „Robotics and Autonomous Systems” 2019, t. 116, s. 162–180, <https://doi.org/10.1016/j.robot.2019.03.003>.
- [7] Chmielowiec A., Łysiak K., Viliš J., *Development of a Basic CAM Processor for a Collaborative Robot for Workshop Automation*, „Technologia i Automatyzacja Montażu” 2024, nr 123(1), s. 37–45, <https://doi.org/10.7862/tiam.2024.1.6>.
- [8] Howse J., *OpenCV computer vision with Python*, t. 27, Birmingham 2013.

Key words: collaborative robot, cobot, voice control, vision system

Identyfikacja termomechaniczna i strukturalna biokompozytu na bazie PLA w efekcie starzenia abiotycznego

*Joanna Tomasik, Miłosz Wrotniak, Stanisław Perestaj, Aneta Tor-Świątek
Koło Naukowe Inżynierii Polimerów CARBON, Politechnika Lubelska*

1. Wstęp

Trudno sobie wyobrazić życie w dzisiejszych czasach bez tworzyw polimerowych. Od czasów rewolucji przemysłowej zakładano, że przedmioty po zużyciu będą utylizowane, jednak z czasem zaczęto przykładać coraz większą wagę do ponownego wykorzystania tworzyw polimerowych (recyklingu) lub wytwarzania produktów w pełni biodegradowalnych [1, 2, 3]. Produkcja i przetwarzanie materiałów mogą mieć wpływ na wiele aspektów środowiska, m.in. wysokie zużycie wody, emisje zanieczyszczeń do powietrza, wody i gleby, zużywanie ważnych zasobów środowiska oraz wykorzystanie gruntu pod wysypiska śmieci, na których wiele z nich będzie zalegało przez lata czy nawet setki lat [1]. Obywatel Unii Europejskiej szacunkowo w ciągu roku zużywa tworzywa polimerowe w ilości od 84 do 129 kg [4]. Przy założeniu, że mamy w Polsce blisko 38 milionów mieszkańców [5], daje to odpowiednio zużycie od 3,1 do 4,8 mln ton tworzyw polimerowych rocznie. Obecnie w większości są one nadal oparte na paliwach kopalnych, natomiast biodegradowalne tworzywa polimerowe stanowią jedynie 1% produkcji [6], a żaden z powszechnie używanych polimerów nie jest biodegradowalny [7]. Od jakiegoś czasu obserwuje się coraz silniejsze naciski ze strony Unii Europejskiej na wytwarzanie produktów, których właściwości pozwolą na ponowne ich wykorzystanie lub będą one biodegradowalne. Na przykład Parlament Europejski i Rada (EU) na mocy dyrektywy 2019/904 dążą do tego, aby do 2030 roku wszystkie opakowania na rynku europejskim nadawały się do ponownego użycia lub recyklingu, planują również opracowanie norm prawnych dla tworzyw biodegradowalnych oraz biopochodnych [8]. Badania degradacji kompozytów polimerowych na bazie PLA wykazały szybką degradację w fazie termofilowej środowiska kompostowania, charakteryzującej się wysokimi temperaturami [9, 10, 11], oraz znaczący wpływ tego procesu na właściwości mechaniczne kompozytu, w tym na deformację

próbek z powodu naprężeń szczątkowych generowanych podczas procesu wytwarzania próbek kompozytowych drukowanych 3D [12] oraz na poprawę wytrzymałości na rozciąganie kompozytu z dodatkiem proszku żelaza [13].

2. Cel pracy

Celami pracy są sprawdzenie możliwości wykorzystania sznurka wykonanego z biokompozytu BIOPLAST105 jako sznurka rolniczego, zbadanie jego właściwości mechanicznych (również w podwyższonej temperaturze), struktury mikro- i makroskopowej oraz właściwości termomechanicznych. Materiałem odniesienia był sznurek wykonany z polipropylenu.

3. Badany materiał oraz metody badań

Badano biokompozyt BIOPLAST105 (prod. BIOTEC z Niemiec). Wykonany jest on głównie z polilaktydu (poli(kwas mlekowy), PLA, ang. *polylactic acid*), skrobi destrukuryzowanej i/lub pochodnej skrobi, kopoliestru alifatyczno-aromatycznego oraz polihydroksyalkanianu (PHA, ang. *polyhydroxyalkanoate*). Dane odnośnie do udziału procentowego poszczególnych składników oraz dodatków są chronione (Patent eur. nr EP2984138A1) i nieudostępniane przez producenta. Badano próbki w formie sznurka ogrodniczego, wyprodukowanego przez firmę NOWEKO sp. z o.o., oznaczone symbolami: 1480TEX, 1550TEX, 1850TEX, zgodnie z parametrami wytwarzania. Materiałem porównawczym był polipropylen, również w formie sznurka, wyprodukowany przez firmę FPH „Daglin”.

Badania właściwości mechanicznych, jak też analizy struktur makro- i mikroskopowej przeprowadzono przed starzeniem, po starzeniu oraz w podwyższonej temperaturze, przeanalizowano badania skaningowej kalorymetrii różnicowej (DSC) oraz pomiar gęstości normalnej metodą piknometryczną.

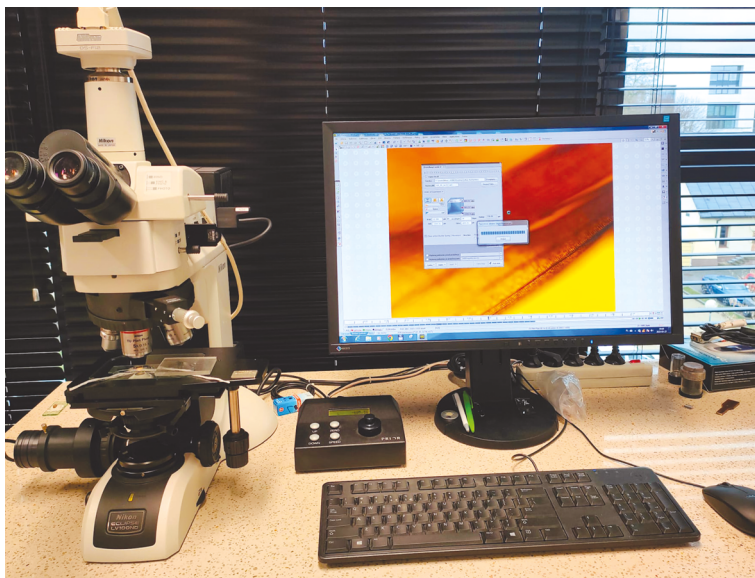
Badania mechaniczne wykonano na maszynie wytrzymałościowej Zwick Z010 (fot. 1). Siła wstępna wynosiła 0,1 MPa, prędkość badania była równa 50 mm/min. Przeprowadzono je przed starzeniem oraz po 3, 6 i 9 tygodniach w komorze. Badania mechaniczne w podwyższonej temperaturze zostały zrobione na tej samej maszynie z wykorzystaniem komory temperaturowej Zwick BW91272 (zakres pomiarowy 80÷250°C), w temperaturach 23°C, 35°C oraz 55°C, które zostały wybrane na podstawie temperatur użytkowych podanych w specyfikacjach ogólnodostępnych sznurków ogrodniczych. Badania przeprowadzono zgodnie z normą PN-EN ISO 527-2:2012 [14].

Strukturę mikroskopową przebadano z wykorzystaniem mikroskopu optycznego Nikon Eclipse LV100ND (fot. 2). Analizę prowadzono w świetle odbitym przy użyciu obiektów: 2,5X; 5X; 10X; 20X.



FOT. 1. Stanowisko do badań mechanicznych bez zamontowanej komory temperaturowej oraz z komorą temperaturową

ŹRÓDŁO: oprac. własne.



FOT. 2. Stanowisko do badań struktury mikroskopowej

ŹRÓDŁO: oprac. własne.

Badania termograwimetryczne (TG) oraz skaningowej kalorymetrii różnicowej (DSC) przeprowadzono z wykorzystaniem jednoczesnego analizatora termicznego NETZSCH STA 449 F3 Jupiter (fot. 3). Krzywe DSC i TG zarejestrowano podczas ogrzewania próbek z szybkością $15^{\circ}\text{C}/\text{min}$ w zakresie temperatury $45\div 700^{\circ}\text{C}$. Badania prowadzono w atmosferze azotu. Wycięte próbki ważono na urządzeniu RADWAG AS 82/220.R2.



FOT. 3. Stanowisko do badań termomechanicznych DSC/TG

ŹRÓDŁO: oprac. własne.

Próbki poddano starzeniu abiotycznemu w komorze starzeniowej TestAn Temperature & Humidity Chamber (fot. 4), w której ustalono temperaturę równą 40°C oraz wilgotność równą 60%. Do zwilżania użyto wody destylowanej. W komorze umieszczono 24 próbki dla każdego typu sznurka. Badanie przeprowadzono zgodnie z normą PN-EN 14806:2010 [15].



FOT. 4. Komora starzeniowa z umieszczonymi w środku próbkami

ŹRÓDŁO: oprac. własne.

Badanie gęstości metodą piknometryczną (fot. 5) wykonano za pomocą piknomietru firmy SIMAX o pojemności około 50 ml w 20°C oraz wagi analitycznej Steinberg SBS-LW Balance scale 200 g/0,001 g. Sznurek został pocięty na około jednocentymetrowe odcinki, a próbka umieszczona była w alkoholu izopropylowym. Pomiar wykonano zgodnie z normą PN-EN ISO 1183 [16]. Gęstość obliczono ze wzoru:

$$\rho = \frac{(m_1 - m_p) \cdot \rho_c}{(m_3 - m_p) - (m_2 - m_1)} \quad (1)$$

gdzie: ρ – gęstość badanej substancji [g/cm^3], ρ_c – gęstość cieczy immersyjnej w danej temperaturze [g/cm^3], m_p – masa pustego piknomietru [g], m_1 – masa piknomietru z próbką [g], m_2 – masa piknomietru z próbką i cieczą [g], m_3 – masa piknomietru z cieczą [g].



FOT. 5. Stanowisko do badań gęstości normalnej metodą piknometryczną

ŹRÓDŁO: oprac. własne.

4. Wyniki badań

Wyniki badań gęstości normalnej zostały przedstawione w tabeli 1. Z kolei w tabelach 2–3 zestawiono odpowiednio wyniki siły zerwania oraz wydłużenia przy zerwaniu dla poszczególnych próbek w temperaturach 23°C, 35°C, 55°C oraz po 3, 6, 9, 12 i 15 tygodniach starzenia. Struktura mikroskopowa została przedstawiona na fot. 6–9. Na wykresach 1–2 zaprezentowano TG/DSC dla poszczególnych próbek.

Wraz ze wzrostem wartości TEX rośnie gęstość normalna próbek. Największe odchylenie standardowe wyniosło 0,0158 kg/m³ dla próbki 1480TEX. Może to świadczyć o jej niehomogeniczności. Dla próbki wykonanej z polipropylenu (PP) otrzymano wyniki 893 kg/m³. Literaturowa wartość gęstości dla PP wynosi 900 kg/m³ [17].

TABELA 1. Wyniki gęstości normalnej dla poszczególnych próbek

Nazwa próbki	PP	1480TEX	1550TEX	1850TEX
Gęstość normalna [kg/m ³]	893	1076	1077	1166
Odchylenie standardowe	0,0083	0,0158	0,0062	0,0107

ŹRÓDŁO: oprac. własne.

TABELA 2. Wyniki siły zerwania dla poszczególnych próbek mierzonych w danych warunkach

Nazwa próbki	Temperatura [°C]			Czas starzenia [tydzień]				
	23	35	55	3	6	9	12	15
	Siła zerwania [N]							
PP	513	96	93	627	680	661	144	144
1480TEX	134	130	137	169	165	183	50	48
1550TEX	37	45	144	195	178	206	6	40
1850TEX	42	193	201	197	226	172	85	50

ŹRÓDŁO: oprac. własne.

Wyniki siły zerwania w podwyższonej temperaturze (tabela 2) wykazały inne zależności dla każdej z próbek. Dla biodegradowalnych zwiększała się wraz z podwyższaniem temperatury, z wyłączeniem próbki 1480TEX, której siła zerwania niewiele się zmieniała. Natomiast wraz ze zwiększaniem się temperatury siła ta spadała w próbce polipropylenowej. Wyniki starzenia (tabela 2) wykazały spadek siły zerwania w przypadku każdej z próbek. Przez dziewięć tygodni siła zerwania niewiele się zmieniała. Po dwunastu tygodniach starzenia zaobserwowano widoczny spadek badanej wielkości.

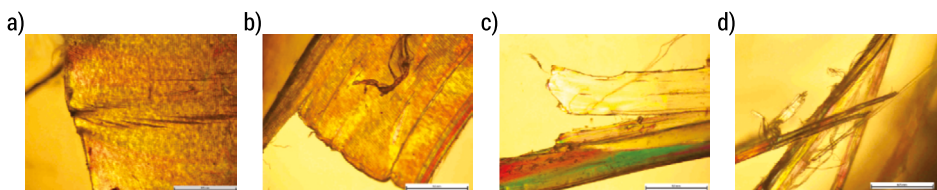
Wydłużenie przy zerwaniu (tabela 3) mierzone w podwyższonej temperaturze zwiększało się wraz ze wzrostem temperatury dla próbek biodegradowalnych 1480TEX, 1850TEX oraz dla próbki polipropylenowej. Badana wielkość dla próbki 1550TEX zmniejszyła się po podwyższeniu temperatury do 35°C, po czym wróciła do początkowej wartości po zwiększeniu temperatury do 55°C. Pod wpływem starzenia wydłużenie przy zerwaniu (tabela 3) zwiększyło się dla każdej próbki. Największą różnicę zaobserwowano między dziewiątym a dwunastym tygodniem starzenia.

TABELA 3. Wyniki wydłużenia przy zerwaniu dla poszczególnych próbek przy danych warunkach

Nazwa próbki	Temperatura [°C]			Czas starzenia [tydzień]				
	23	35	55	3	6	9	12	15
	Wydłużenie przy zerwaniu [mm]							
PP	11,0	36,8	39,4	8,9	10,3	11,9	13,8	13
1480TEX	18,2	24,8	24,9	15,0	18,0	20,0	30,9	31,5
1550TEX	24,3	21,8	24,0	17,8	18,5	20,6	34,5	39,1
1850TEX	19,9	22,2	29,5	14,7	18,9	24,8	30,9	35,7

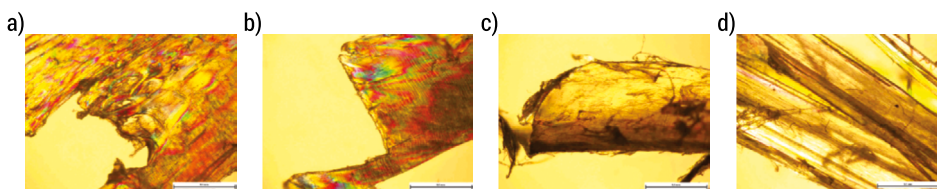
ŹRÓDŁO: oprac. własne.

Typy przełomów zmieniają się wraz ze zmianami w temperaturze. Przy 23°C próbka 1480TEX (fot. 6a) wykazała cechy przełomu zmęczeniowego bez przerwania, a próbki 1550TEX oraz 1850TEX (fot. 6b, 6c) przełomu kruchego z rozwarstwieniem wzdłuż biokompozytu. Badanie w 55°C zwiększyło plastyczność dla próbek 1480TEX i 1850TEX (fot. 7a, 7c). Dla sznurka z polipropylenu wystąpiło konsekwentne pękanie ciągłe włókien.



FOT. 6. Morfologia przełomów próbek po badaniach mechanicznych w temperaturze 23°C: a) 1480TEX z podziałką 0,5 mm, b) 1550TEX z podziałką 0,5 mm, c) 1850TEX z podziałką 0,6 mm, d) PP z podziałką 0,25 mm

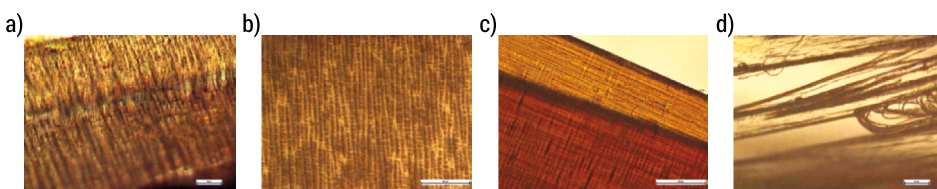
ŹRÓDŁO: oprac. własne.



FOT. 7. Morfologia przełomów próbek po badaniach mechanicznych w podwyższonej temperaturze 55°C: a) 1480TEX z podziałką 0,5 mm, b) 1550TEX z podziałką 0,6 mm, c) 1850TEX z podziałką 0,6 mm, d) PP z podziałką 0,5 mm

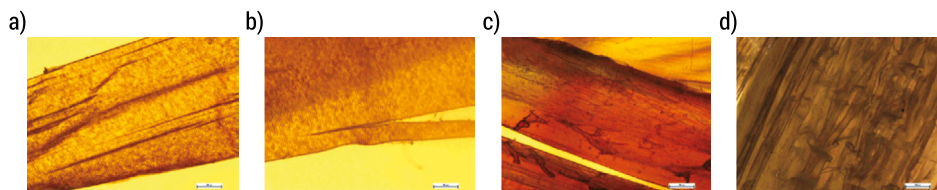
ŹRÓDŁO: oprac. własne.

Starzenie biokompozytów w kontrolowanych warunkach w czasie trzech tygodni spowodowało wyróżnienie się nierówności powierzchni dla 1480TEX i 1550TEX (fot. 8a, 8b), podczas gdy 1850TEX (fot. 8c) pozostało porównywalnie gładkie. Dla dziewięciu tygodni starzenia się we wszystkich badanych próbkach biokompozytu wystąpiło pękanie, a w 1850TEX (fot. 9c) – łuszczenie się powierzchni.



FOT. 8. Morfologia przełomów próbek po badaniach mechanicznych po trzech tygodniach starzenia dla próbek: a) 1480TEX z podziałką 50 µm, b) 1550TEX z podziałką 100 µm, c) 1850TEX z podziałką 200 µm, d) PP z podziałką 50 µm

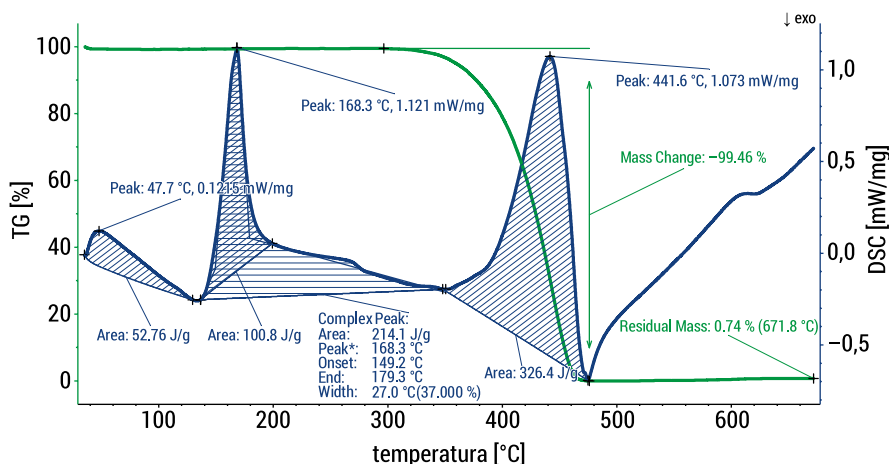
ŹRÓDŁO: oprac. własne.



FOT. 9. Morfologia przełomów próbek po badaniach mechanicznych po dziewięciu tygodniach starzenia dla próbek: a) 1480TEX z podziałką 200 µm, b) 1550TEX z podziałką 200 µm, c) 1850TEX z podziałką 200 µm, d) PP z podziałką 200 µm

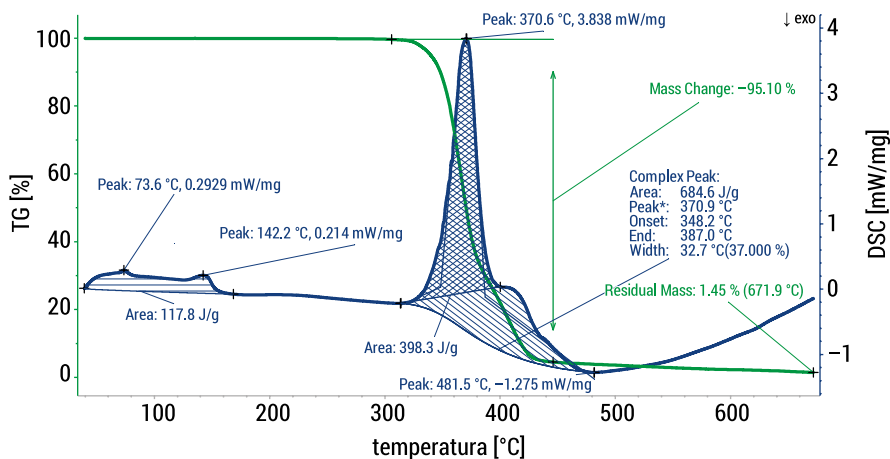
ŹRÓDŁO: oprac. własne.

Kształt wszystkich krzywych TG (zielona linia na wykresach 1–4) wskazuje na jednoetapowy rozkład, a szybkość ubytku masy była w zasadzie stała. Wszystkie próbki były termicznie stabilne do temperatury 300°C. Temperatura początku degradacji została wyznaczona jako temperatura ubytku 5% masy ($T_{5\%}$). Rozkład próbek wykonanych z biokompozytów (wykresy 2–4) rozpoczął się przy około 340°C, a zakończył się przy temperaturze około 420°C. Natomiast dla próbki wykonanej z PP (wykres 1) rozkład rozpoczął się przy około 360°C i zakończył przy około 460°C. Całkowity ubytek masy dla próbek wykonanych z biokompozytów wyniósł od 91,5% do 95%, natomiast dla próbki wykonanej z PP było to 99,5%. Dla próbek biokompozytowych ubytek masy był mniejszy, co świadczy o większym udziale substancji nieorganicznych, które nie uległy degradacji. Próbka z polipropylenu zdegradowała się w zasadzie całkowicie.



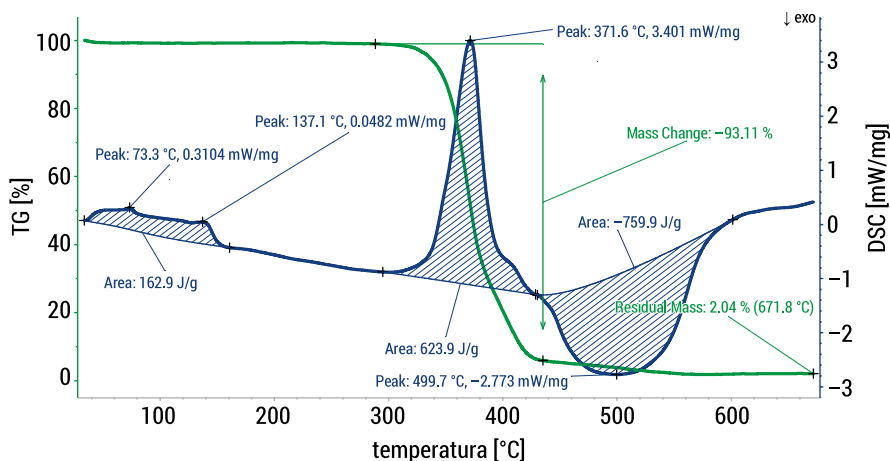
WYKRES 1. DSC/TG dla próbki wykonanej z polipropylenu

ŹRÓDŁO: oprac. własne.



WYKRES 2. DSC/TG dla próbki wykonanej z biokompozytu, oznaczonej 1480TEX

ŹRÓDŁO: oprac. własne.

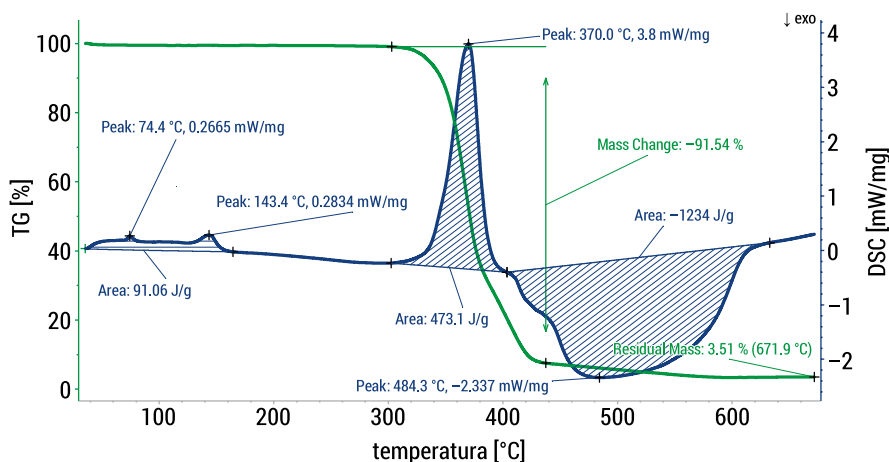


WYKRES 3. DSC/TG dla próbki wykonanej z biokompozytu, oznaczonej 1550TEX

ŹRÓDŁO: oprac. własne.

Analiza wykresu DSC dla polipropylenu (niebieska linia na wykresie 1) wykazała zgodność z wynikami literaturowymi. Wyznaczona temperatura topnienia (T_m) wynosi 168,3°C (wartość literaturowa = 160–208°C) [18], a ciepło topnienia 100,8 J/g (ΔH_m). Pik przy temperaturze 441,6°C pochodzi z pirolizy materiałów organicznych, natomiast pik przy 47,7°C może pochodzić z modyfikatorów lub zanieczyszczeń. Dla próbek wykonanych z biokompozytu (wykresy 2–4) nie obserwujemy wyraźnego pików dla temperatury topnienia z uwagi na różne właściwości termiczne poszczególnych składników kompozytu. Dla wszystkich próbek zauważono dwa wyraźniejsze pików dla około 74°C i około 140°C. ΔH_m dla poszczególnych próbek wyniosło: 1480TEX – 117,8;

1550TEX –162,9 oraz 1850TEX – 91,06 J/g. Pik przy temperaturze około 370°C pochodzi z pirolizy związków organicznych. Pik endotermiczny przy 500°C pochodzi z rozkładu termicznego PLA, PHA oraz kopoliestrów.



WYKRES 4. DSC/TG dla próbki wykonanej z biokompozytu, oznaczonej 1850TEX

ŹRÓDŁO: oprac. własne.

2. Wnioski

Wyznaczona gęstość normalna poszczególnych próbek wykonanych z biokompozytów wyniosła od 1,08 do 1,17 g/cm³, natomiast dla próbki wykonanej z polipropylenu 0,89 g/cm³, co pokrywa się z wartością literaturową.

Podwyższanie temperatury inaczej wpływało na wyniki siły zerwania każdej z próbek, natomiast starzenie powodowało spadek tej wartości dla wszystkich próbek. Największy spadek siły zerwania zaobserwowano po dwunastu tygodniach starzenia. Na wyniki wydłużenia przy zerwaniu dla próbek biodegradowalnych większy wpływ miało starzenie, próbki te wykazywały zwiększenie badanej wielkości wraz z kolejnymi tygodniami starzenia. Na próbkę polipropylenową większy wpływ miała temperatura, której podnoszenie skutkowało wzrostem rozciągnięcia przy zerwaniu próbki. Biokompozyt różnił się znacznie w sposobie pękania w czasie badań mechanicznych w dwóch różnych temperaturach bez starzenia, jednak występowała niekonsekwentność zarówno w sposobie przerwania, jak i formy pęknięć, co wskazuje na niehomogeniczną strukturę próbek.

Degradacja próbek biokompozytowych rozpoczęła się przy temperaturze 340°C, natomiast dla próbki PP było to 360°C. Próbki wykonane z biokompozytu zawierały około 1,5–3% mas substancji, które nie uległy degradacji. Brak wyraźnego pikowania w tych próbkach wskazuje na niejednorodność ich struktury i różnorodność

składników, które mogą wykazywać szeroki zakres temperatur przemian termicznych. Wysokie temperatury degradacji biokompozytów potwierdzają, że możliwe jest wykorzystanie tych materiałów w przetwórstwie tworzyw polimerowych metodą wytłaczania z wykorzystaniem klasycznych maszyn technologicznych.

Literatura

- [1] Allwood J.M., Ashby M.F., Gutowski T.G., Worrell E., *Material efficiency: A white paper*, „Resources, Conservation and Recycling” 2011, vol. 55(3), s. 362–381.
- [2] Szafraniec M., Grabias-Blicharz E., Drożdziel-Jurkiewicz M., Tor-Świątek A., *The use of PLA filled with fibrillar nanocellulose from wastepaper as an expansion joint material*, „Polimery” 2023, vol. 68(2), s. 93–98.
- [3] Tor-Świątek A., Garbacz T., Stloukal P., *Analysis of Selected Properties of Microporous PLA as a Result of Abiotic Degradation*, „Materials” 2022, vol. 15(9), 3133.
- [4] Amadei A., Sanyé-Mengual E., Sala S., *Modeling the EU plastic footprint: Exploring data sources and littering potential*, „Resources, Conservation and Recycling” 2022, vol. 178.
- [5] Lisiak E., Morytz-Balska E., *Polska w liczbach 2023*, Główny Urząd Statystyczny, Warszawa 2023.
- [6] Maddah H.A., *Polypropylene as a Promising Plastic: A Review*, „American Journal of Polymer Science” 2016, vol. 6(1), s. 1–11.
- [7] Geyer R., Jambeck J., Law K., *Production, use, and fate of all plastics ever made*, „Science Advances” 2017, vol. 3(7).
- [8] Directive (EU) 2019/904 of the European Parliament and of the Council of 5 June 2019 on the reduction of the impact of certain plastic products on the environment, 2019.
- [9] Drohsler P., Yasir M., Fabian D., Cisar J., Yadollahi Z., Sedlarik V., *Comparative degradation study of a biodegradable composite based on polylactide with halloysite nanotubes and a polyacrylic acid copolymer*, „Materials Today Communications” 2022, vol. 33, 104400.
- [10] Mueller R.F., *Biological degradation of synthetic polyesters – Enzymes as potential catalysts for polyester recycling*, „Process Biochemistry” 2006, vol. 41(10), s. 2124–2128, <https://doi.org/10.1016/j.procbio.2006.05.018>.
- [11] Lipsa R., Tudorachi N., Darie-Nita R. N., Oprică L., Vasile C., Chiriac A., *Biodegradation of poly(lactic acid) and some of its based systems with Trichoderma viride*, „International Journal of Biological Macromolecules” 2016, vol. 88, s. 515–526, <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2016.04.017>.
- [12] Zhang Z., Cao B., Jiang N., *The Mechanical Properties and Degradation Behavior of 3D-Printed Cellulose Nanofiber/Poly(lactic Acid) Composites*, „Materials” 2023, vol. 16, 6197, <https://doi.org/10.3390/ma16186197>.
- [13] Oksiuta Z., Jalbrzykowski M., Mystkowska J., Romanczuk E., Osiecki T., *Mechanical and Thermal Properties of Polylactide (PLA) Composites Modified with Mg, Fe, and Polyethylene (PE) Additives*, „Polymers” 2020, vol. 12, 2939, <https://doi.org/10.3390/polym12122939>.
- [14] ISO 527-2:2012, Plastics – Determination of tensile properties Part 2: Test conditions for moulding and extrusion plastics.
- [15] PN EN 14806:2010, Opakowania – Ocena wstępna rozpadu materiałów opakowaniowych w symulowanych warunkach kompostowania w badaniach w skali laboratoryjnej.

- [16] PN-EN ISO 1183-1:2019-05, Tworzywa sztuczne – Metody oznaczania gęstości tworzyw sztucznych nieporowatych – Część 1: Metoda zanurzeniowa, metoda piknometru cieczowego i metoda miareczkowa.
- [17] Tripathi D., *Practical Guide to Polypropylene*, Shrewsbury 2002.
- [18] Caban R., Gnatkowski A., *Wpływ obróbki cieplnej na właściwości termiczne kompatybilizowanych mieszanin polimerów*, „Inżynieria Materiałowa” 2008, vol. 29(6), s. 977–980.

Key words: polymer, biocomposite, mechanical properties, thermomechanical properties

Wpływ wysokości warstwy na jakość druku 3D dla wybranych materiałów konstrukcyjnych

Oskar Sarnecki, Valerii Prykhodzenko, Mariusz Kłonica
Koło Naukowe Podstaw Inżynierii Produkcji, Politechnika Lubelska

1. Wstęp

Drukowanie przestrzenne (ang. *3D printing*) jest sposobem wytwarzania elementów metodą przyrostową. Jego początki sięgają 1980 roku. Jako pierwszy drukarkę 3D opatentował Chuck Hull. Wykorzystał do tego technikę SLA, której założeniem jest utwardzanie kolejnych warstw światłoczułej żywicy jedna na drugiej aż do wykonania końcowego elementu. W następnych latach pojawiały się coraz nowsze metody druku 3D. Jednymi z najpopularniejszych są [1]: *fused deposition modelling* (FDM), *stereolithography* (SLA), *digital light processing* (DLP), *selective laser sintering* (SLS). Jedną z najstarszych i najpowszechniejszych metod druku 3D jest FDM, która polega na nakładaniu na siebie kolejnych warstw materiału aż do uzyskania gotowego elementu. Przed przystąpieniem do druku potrzebny jest model 3D wykonany w programie CAD, np. Inventor, Fusion, Solidworks itp. Przekształcany jest on za pomocą slicera (Cura, Slicer, ideaMaker itp.) w G-Code, czyli zestaw poleceń dla maszyny CNC.

Materiał nanoszony jest na stół przez dyszę, które podgrzewane są do temperatury zależnej od wybranego materiału. Uzyskanie docelowego kształtu odbywa się poprzez odpowiedni ruch głowicy, przedmiotu obrabianego – lub jednego i drugiego – wzdłuż osi X i Y równoległej do stołu. Nanoszenie kolejnych warstw jest możliwe za pomocą skoku wzdłuż osi Z [2].

Czynnikami, które powodują, że metoda FDM jest tak często stosowana, są: względna prostota drukowania, dobre właściwości mechaniczne, dostępność materiałów, możliwość druku przez maszyny zbudowane przez osoby prywatne.

W ciągu lat zmianom uległy nie tylko metody drukowania, lecz także wykorzystywane w tym celu materiały. Poza tworzywami sztucznymi elementy robione metodą przyrostową mogą być wykonywane z żywicy lub metalu [3]. Dobór materiału jest uzależniony od możliwości drukarki oraz właściwości, jakie ma mieć gotowy obiekt. Największą popularnością cieszą się wydruki wykonane z materiałów PLA i ABS.

PLA (polikadyt) jest materiałem biodegradowalnym. Filament idealnie sprawdza się do druku metodą FDM. PLA nazywany jest materiałem „najłatwiejszym do druku” z uwagi na jego właściwości [4, 5], takie jak mały skurcz przetwórczy czy też możliwości druku bez zamkniętej komory, ze względnie dużą prędkością, a także skomplikowane kształty [6, 7].

ABS (kopolimer akrylonitrylo-butadieno-styrenowy) jest najczęściej stosowanym materiałem w druku 3D. Dodatkowo wykorzystuje się go do produkcji elementów poprzez wytwarzanie wtryskowe. ABS ma bardzo duży skurcz termiczny, co może powodować trudności w druku, szczególnie na drukarce bez zamkniętej komory. Z tego względu przy stygnięciu zaleca się również stosowanie środków adhezyjnych w celu zwiększenia przyczepności pierwszej warstwy do stołu. Wśród zalet tego materiału można też wymienić większą wytrzymałość mechaniczną oraz większą (w stosunku do PLA) wytrzymałość na wyższe temperatury. ABS znalazł zastosowanie przy produkcji [8, 9] mniej wymagających części maszyn, elementów obciążonych, np. części drukarki.

Wybór drukarki jest zatem uzależniony od tego, co chcemy osiągnąć. Te niskobudżetowe zazwyczaj mają jedną głowicę drukującą oraz nie mają komory. Zazwyczaj stosowane są do wyrobów artystycznych, takich jak makiety lub proste części maszyn, które nie są obciążone dużymi siłami. Najczęściej wykorzystuje się na nich materiały typu PLA. Drukarki profesjonalne mogą mieć więcej głowic drukujących, zamkniętą komorę oraz stół z automatycznym poziomowaniem. Generalnie używane są przez duże firmy do produkcji części maszyn o dużym obciążeniu bądź wielkogabarytowych elementów. Drukarki 3D są rozwijane w celu poprawy jakości samego druku, a każda firma wprowadza własne rozwiązania.

Druk 3D jako branża przemysłu z roku na rok zdobywa coraz większe zainteresowanie. Jednak pomimo znacznego rozwoju nie jest jeszcze na etapie powszechnego zastosowania [10]. Być może za krótko istnieje w porównaniu z innymi metodami wytwarzania. Warto jednak pamiętać, że technologia druku 3D rozwija się coraz intensywniej ze względu na szerokie użycie w różnych gałęziach przemysłu, takich jak: szybkie prototypowanie, elektronika przemysłowa, medycyna, motoryzacja i lotnictwo [11].

Obecnie druk 3D wykorzystują zarówno wielkie korporacje do wytwarzania swoich wyrobów, jak i coraz częściej osoby prywatne do własnych celów [12].

2. Badania

Celem pracy było przeprowadzenie badań wpływu grubości warstwy próbek wykonanych metodą druku 3D na wytrzymałość i dokładność powierzchni. Podczas ich realizacji wykonano statyczną próbę na rozciąganie oraz badania wybranych parametrów chropowatości powierzchni na profilometrze. Badane próbki miały następujące grubości warstw: 0,12 mm, 0,20 mm oraz 0,28 mm.

Do początkowego wykonania modelu badanych próbek oraz do wykonania G-Code wykorzystano programy komputerowe Autodesk Inventor 2024 i Ultimaker Cura 5.2.1. Próbki zaś wydrukowano na drukarkach Creality Ender-3 oraz DOUBLE P255-3DGence.

3. Metodyka badań

Jak wspomniano, do wykonania projektu wybrano dwie drukarki 3D: Creality Ender-3 i DOUBLE P255-3DGence. Maszyny te różnią się wieloma parametrami, takimi jak liczba głowic drukujących, wielkość stołu roboczego czy możliwość druku z zamkniętą komorą. Jedną z głównych różnic jest ich cena. Drukarka firmy Ender jest drukarką niskobudżetową, która jest najczęściej początkowym wyborem osób prywatnych. Drukarka firmy 3DGence jest w większym stopniu przeznaczona do firmowych działań przemysłowych. Wyniki badań pozwolą porównać jakość elementów stworzonych przez drukarki do zadań profesjonalnych oraz amatorskich.

W celu przeprowadzenia badań wytrzymałościowych wykorzystano maszynę wytrzymałościową ZWICK/ROELL Z150. Kluczowym parametrem, który zadecydował o jej wyborze, jest maksymalna siła zrywająca, która wynosi 150 kN. Oprócz tego podczas badań do dyspozycji była również maszyna wytrzymałościowa ZWICK/ROELL Z2,5 o maksymalnej sile zrywającej 2,5 kN. To właśnie na niej wykonano pierwsze dwa pomiary (badania wstępne), jednak podczas próby zaobserwowano zbyt mały zakres pomiarowy, co spowodowało zmianę urządzenia.

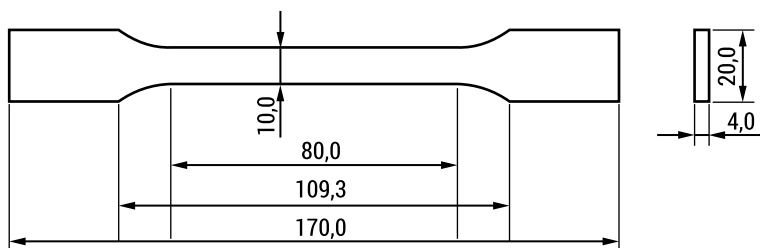
Do badań wybranych parametrów chropowatości powierzchni wykonanych elementów zastosowano urządzenie do pomiaru konturu, chropowatości oraz topografii 3D model T8000 RC120-400 firmy Hommel-Etamic. W tabeli 1 zestawiono parametry drukarek użytych w badaniach.

TABELA 1. Parametry drukarek DOUBLE P255-3DGence i Creality Ender 3

Parametr	Creality Ender 3	DOUBLE P255-3DGence
Technologia druku	FDM	FFF
Przestrzeń robocza	220 × 220 × 250 mm	190 × 255 × 195 mm
Filament	PLA, TPU, ABS	PLA, PP, PA, ABS, TPU
Grubość warstwy	0,1–0,4mm	minimalnie 20 µm
Temperatura dyszy	255°C	270°C
Temperatura stołu	110°C	160°C

ŹRÓDŁO: [13, 14].

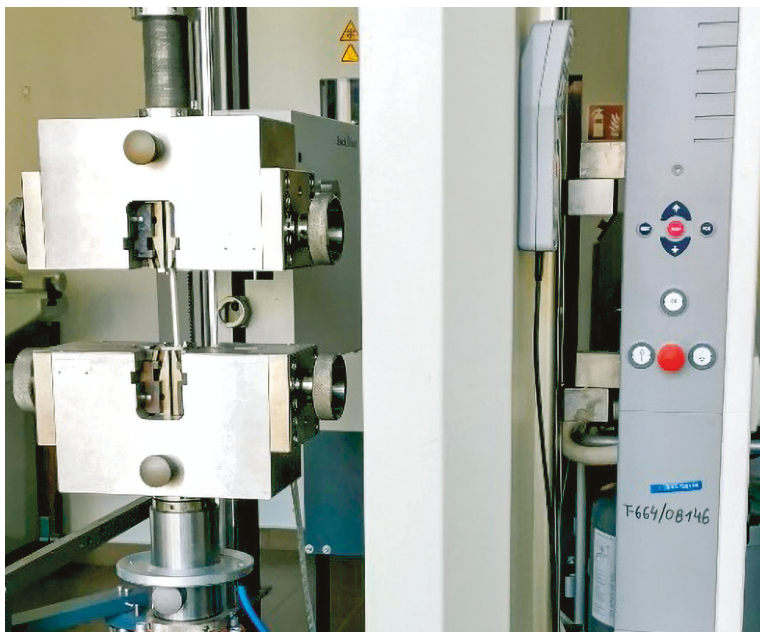
Badania przeprowadzono zgodnie z normą PN-EN ISO 527-1:2012. W celu wyeliminowania błędów pomiarowych wykonano cztery próbki dla każdej grubości warstwy, a wynikiem badań była średnia z czterech pomiarów. W ten sposób całkowita liczba próbek wynosiła 36 sztuk. Na rys. 1 przedstawiono wymiary próbek wg powyższej normy.



RYS. 1. Wymiary próbki względem normy PN-EN ISO 527-1:2012

ŹRÓDŁO: oprac. własne.

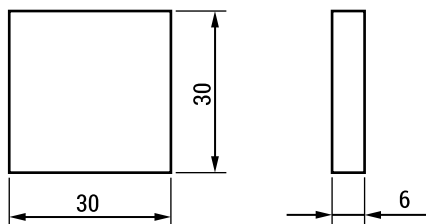
Na fot. 1 przedstawiono zamocowaną próbkę w uchwycie maszyny wytrzymałościowej ZWICK/ROELL Z 150. Prędkość trawersy podczas badania wynosiła 1 mm/min, siła wstępna 0,1 MPa, natomiast uchwyty przy pozycji startowej znajdowały się w odległości 120 mm.



FOT. 1. Próbkę zamocowaną w szczękach maszyny

ŹRÓDŁO: oprac. własne.

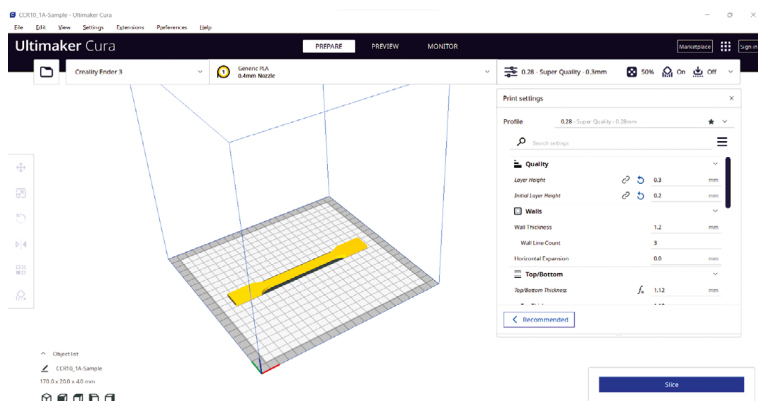
W celu przeprowadzenia pomiarów chropowatości próbek i wykonania obrazu struktury powierzchni wykorzystano urządzenie do pomiaru konturu, chropowatości oraz topografii 3D T8000 RC120-400 firmy Hommel-Etamic. Użyto próbek o grubościach warstwy: 0,12 mm, 0,20 mm, 0,28 mm oraz wymiarach 30×30 mm (rys. 2). Wykonano skanowanie próbek o wymiarach 3×3 mm.



RYS. 2. Wymiary próbki do badań wybranych parametrów chropowatości powierzchni

ŹRÓDŁO: oprac. własne.

Po ustaleniu parametrów próbek przystąpiono do tworzenia modeli komputerowych. Posłużono się programem Autodesk Inventor 2024. Następnie wykonano G-Code dla drukarek 3D. W tym celu użyto programów Ultimaker Cura 5.2.1 oraz Slicer 4.0 firmy 3D Gence. Na rys. 3 przedstawiono próbki w programie Ultimaker Cura 5.2.1 przeznaczonym do badań wytrzymałościowych.



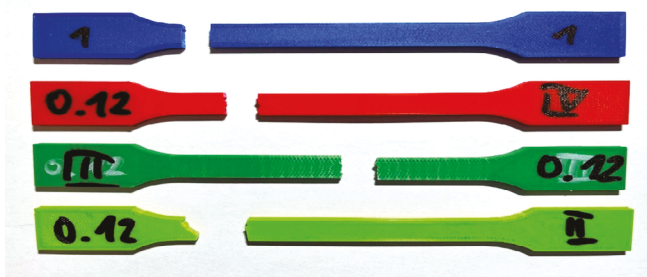
RYS. 3. G-code w programie Ultimaker Cura 5.2.1 próbki do badań wytrzymałościowych

ŹRÓDŁO: oprac. własne.

Program pozwala na zobrazowanie toru ruchu dyszy dla danej warstwy oraz pokazuje szacowany czas trwania wydruku.

4. Wyniki badań

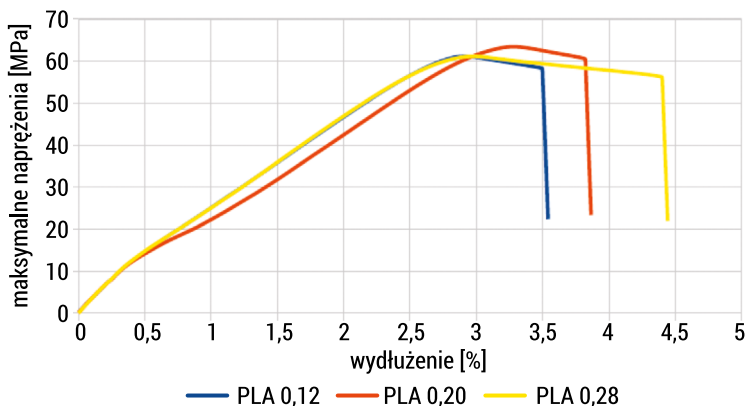
Analizie poddano następujące parametry: maksymalne dopuszczalne naprężenia, moduł Younga oraz wybrane parametry chropowatości powierzchni. Wyniki badań zamieszczono w tabeli oraz na wykresach, na których porównano próbki wykonane na drukarkach Creality Ender-3 i DOUBLE P255-3DGence. Analizie poddano również dwa materiały – PLA i ABS. Na fot. 2 przedstawiono próbki po statycznej próbie na rozciąganie.



FOT. 2. Próbkki po statycznej próbie na rozciąganie

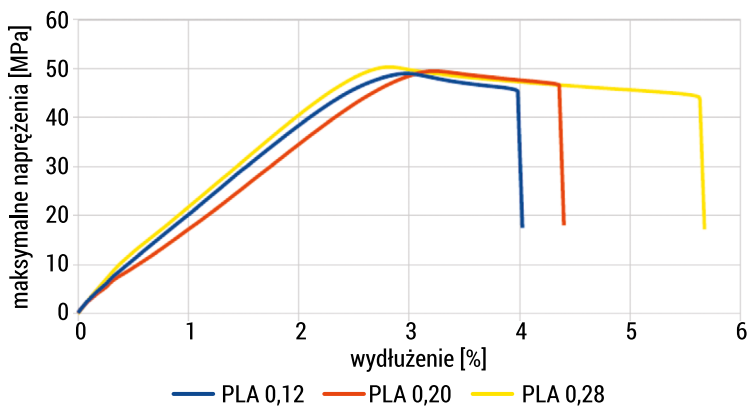
ŹRÓDŁO: oprac. własne.

W dalszej części pracy zaprezentowano wyniki badań statycznej próby na rozciąganie. Na wykresach 1–3 przedstawiono wykresy krzywych naprężeń próbek w zestawieniach grubości warstw 0,12 mm, 0,20 mm oraz 0,28 mm w celu zobrazowania różnic w przebiegu procesu zrywania. Wykres 1 przedstawia przebieg naprężeń próbek wykonanych z materiału PLA na drukarce Ender 3. Na wykresie 2 ukazano krzywe naprężeń próbek PLA wykonanych na drukarce 3D Gence, a na wykresie 3 wyniki badań rozciągania próbek wykonanych z ABS.



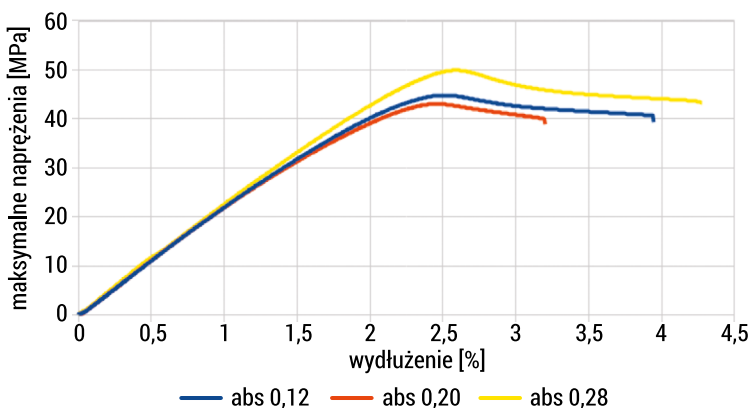
WYKRES 1. Krzywe naprężeń próbek z materiału PLA wykonanych na drukarce Ender 3

ŹRÓDŁO: oprac. własne.



WYKRES 2. Krzywe naprężeń próbek z materiału PLA wykonanych na drukarce 3D Gence

ŹRÓDŁO: oprac. własne.



WYKRES 3. Krzywe naprężeń próbek z materiału ABS wykonanych na drukarce 3D Gence

ŹRÓDŁO: oprac. własne.

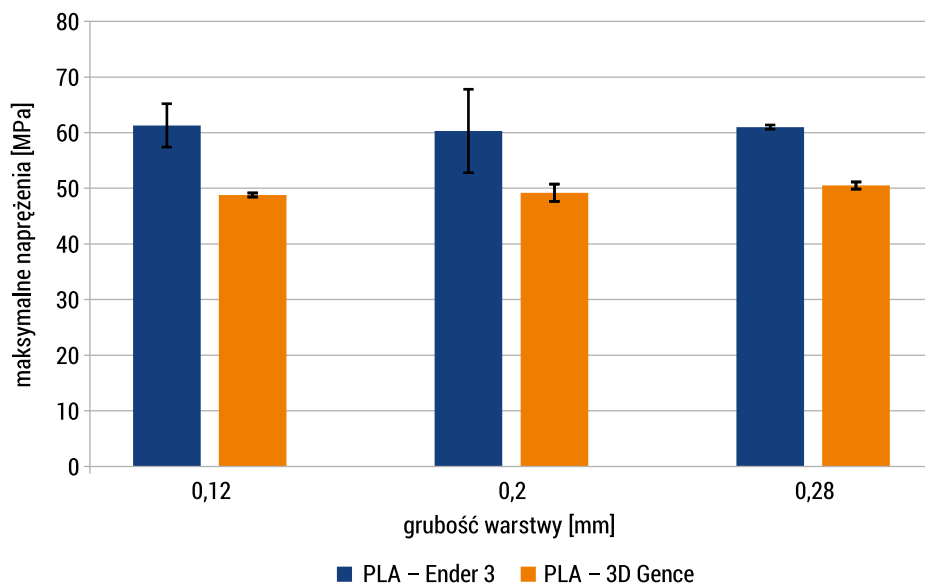
Analizując wyniki badań przedstawione na wykresach 4–5, możemy zaobserwować, że dla materiału PLA zmiana wysokości warstwy w niewielkim stopniu wpływa na wytrzymałość próbek. Uwzględniając odchylenie standardowe, stwierdzono, że rzeczywiste maksymalne naprężenia mogą być bardzo zbliżone. Z analizy porównawczej materiałów PLA i ABS wynika, że w dwóch przypadkach (grubość warstwy 0,12 mm i 0,20 mm) próbki PLA charakteryzują się wyższą wytrzymałością. W tabeli 2 zestawiono wyniki pomiaru maksymalnych naprężeń próbek z materiałów PLA i ABS wykonanych na drukarkach Ender 3 i 3D Gence.

TABELA 2. Naprężenia średnie wraz z wartością odchylenia standardowego próbek z materiału PLA i ABS podawane w MPa wykonanych na drukarkach Ender 3 oraz 3D Gence

Grubość warstwy [mm]	PLA – Ender 3 [MPa]	Odchylenie standardowe [MPa]	PLA – 3D Gence [MPa]	Odchylenie standardowe [MPa]	ABS – 3D Gence [MPa]	Odchylenie standardowe [MPa]
0,12	61,3	3,9	48,8	0,36	45,2	0,96
0,20	60,3	7,5	49,2	1,55	42,8	1,27
0,28	61	0,38	50,5	0,64	50,2	0,4

ŹRÓDŁO: oprac. własne.

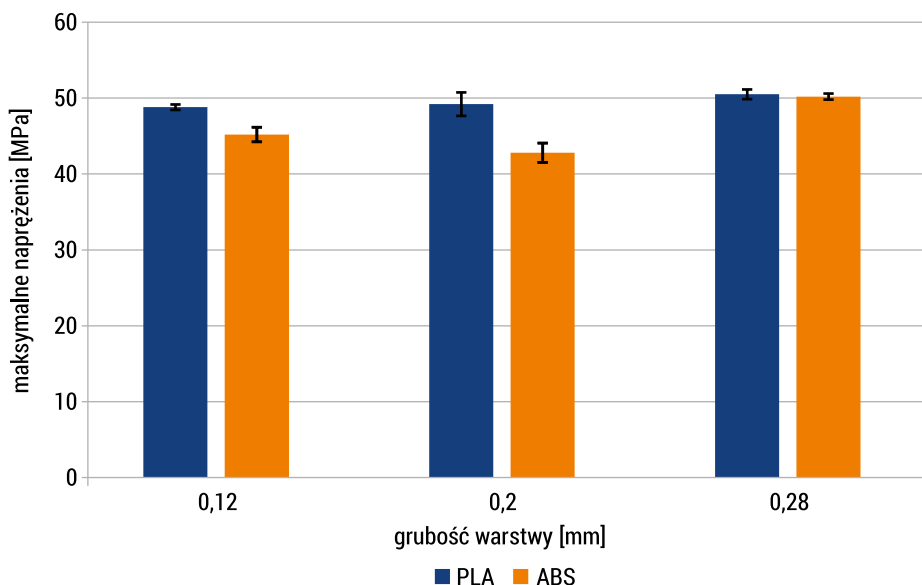
Na wykresie 4 porównano wartości maksymalnych naprężeń materiału PLA wykonanych na drukarkach Ender 3 oraz 3D Gence.



WYKRES 4. Wartości średnie maksymalnych naprężeń próbek wykonanych z materiału PLA

ŹRÓDŁO: oprac. własne.

Na wykresie 5 porównano maksymalne naprężenia próbek wykonanych z PLA w stosunku do próbek wykonanych z ABS wykonanych na drukarce 3D Gence.



WYKRES 5. Wartości średnie maksymalnych naprężeń próbek z materiału PLA (niebieski wykres) i ABS (pomarańczowy wykres) wykonanych na drukarce 3D Gence w zależności od grubości warstwy

ŹRÓDŁO: oprac. własne.

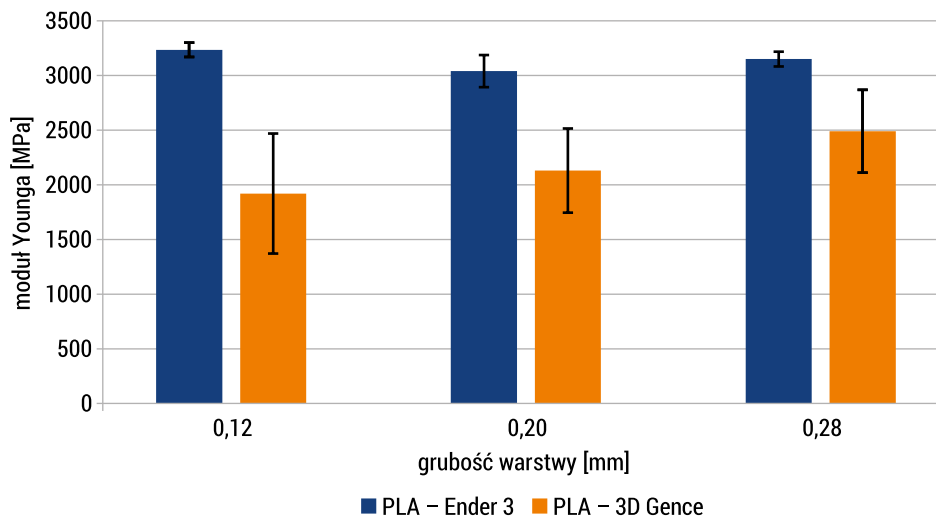
Porównując drukarkę Ender 3 z DOUBLE P255, możemy zauważyć, że moduł Younga w przypadku tej pierwszej jest wyższy niż w przypadku drukarki 3D Gence, co przedstawiono na wykresie 6. Z kolei na wykresie 7 możemy zauważyć, że ABS cechuje się większym średnim modułem Younga w porównaniu z próbkami wykonanymi z PLA, jednak wraz ze wzrostem warstwy ta różnica maleje.

W tabeli 3 zestawiono wyniki pomiaru modułu Younga wraz z odchyleniem standardowym dla analizowanych materiałów.

TABELA 3. Moduły Younga próbek wraz z wartością odchylenia standardowego z PLA i ABS podawane w MPa, wykonane na drukarkach Ender 3 i 3D Gence

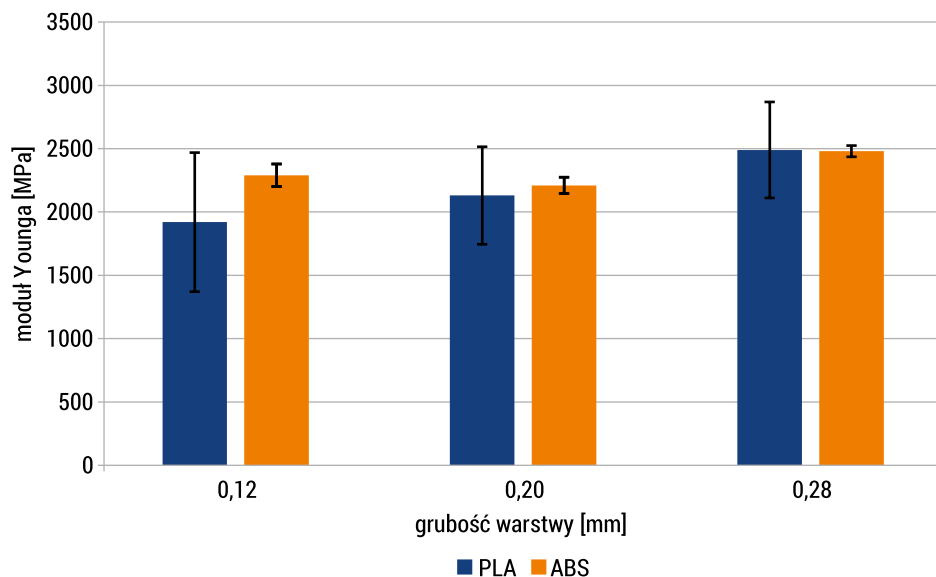
Grubość warstwy [mm]	PLA – Ender 3 [MPa]	Odchylenie standardowe [MPa]	PLA 3D Gence [MPa]	Odchylenie standardowe [MPa]	ABS 3D Gence [MPa]	Odchylenie standardowe [MPa]
0,12	3235	65,6	1920	549	2290	89
0,20	3040	147	2130	385	2210	64,5
0,28	3150	67,6	2490	379	2480	44,4

ŹRÓDŁO: oprac. własne.



WYKRES 6. Wartości średnie modułów Younga próbek z materiału PLA wykonanych na drukarkach: a) Ender 3 (niebieski wykres) b) 3D Gence (pomarańczowy wykres) w zależności od grubości warstwy

ŹRÓDŁO: oprac. własne.

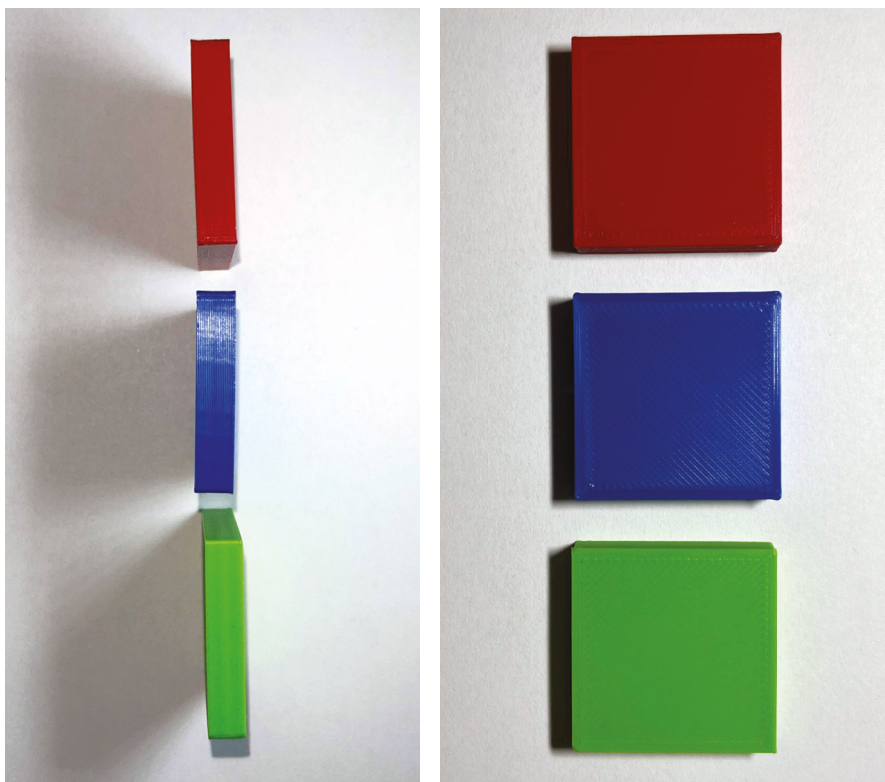


WYKRES 7. Wartości średnie modułów Younga próbek z materiału PLA (niebieski wykres), oraz ABS (pomarańczowy wykres) wykonanych na drukarce 3D Gence w zależności od grubości warstwy

ŹRÓDŁO: oprac. własne.

Wyniki badań wybranych parametrów chropowatości obejmują obrazy struktury powierzchni. Pomiar wykonano na próbce „kostce” o wymiarach 30×30 mm. Parametry pomiaru zebrano z pięciu wybranych punktów, wyznaczono średnią oraz odchylenie standardowe.

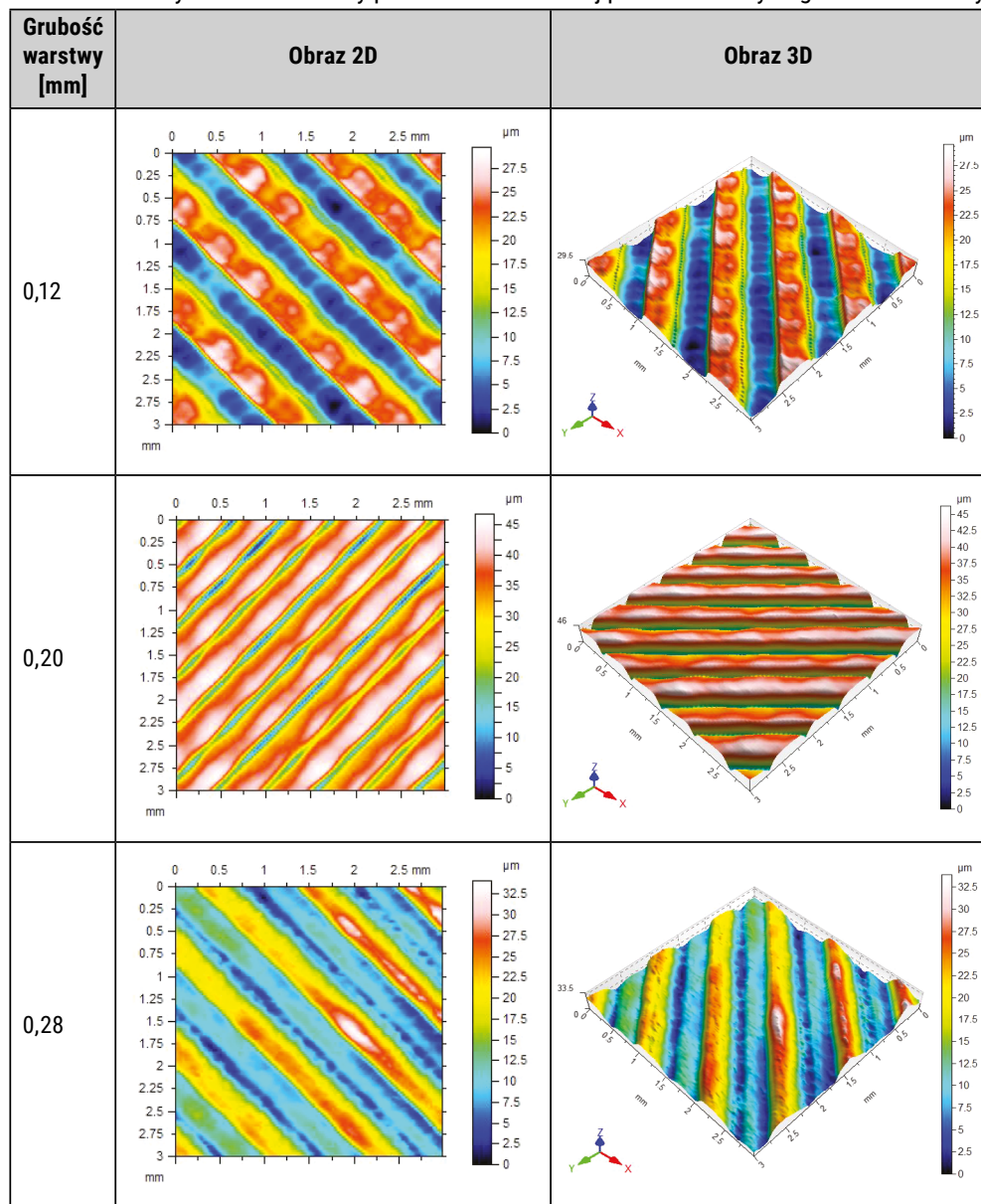
Poniżej przedstawiono wyniki badań struktury powierzchni próbek wykonanych z materiału PLA za pomocą drukarki Ender 3. Na fot. 3 zobrazowano widok powierzchni czołowej i bocznej elementów. W tabelach 4 i 5 ukazano obrazy 2D i 3D powierzchni kostek. Na zdjęciach widać sposób układania się warstw, a na obrazach wykonanych na maszynie T8000 RC120-400 ustawienie warstw w sposób baryłkowy.



FOT. 3. Próbkki do badań chropowatości powierzchni: a) bocznej, b) czołowej

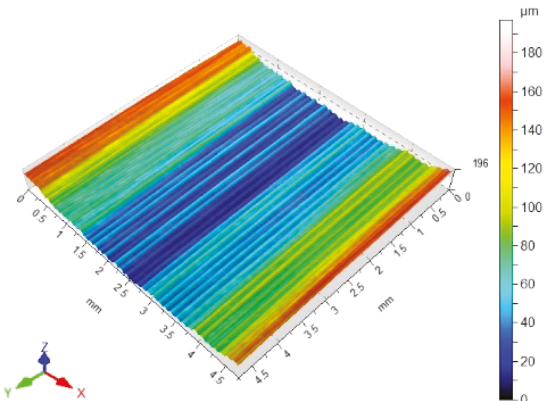
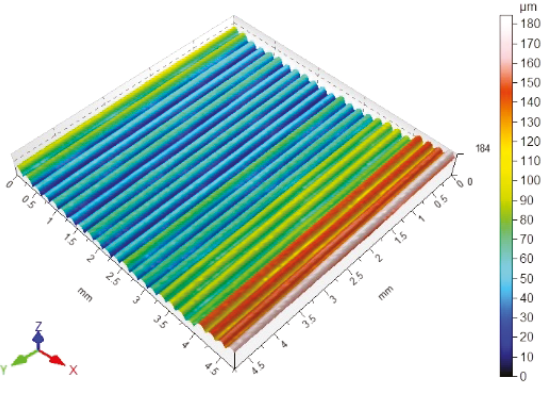
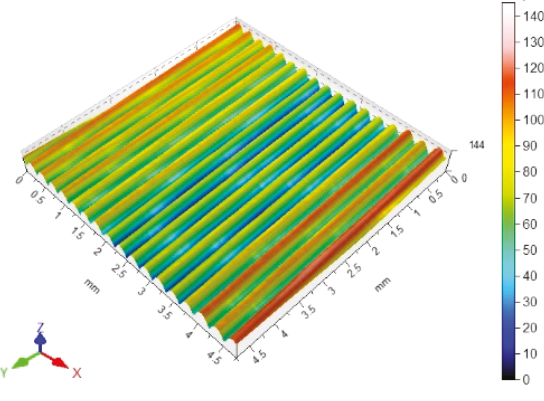
ŹRÓDŁO: oprac. własne.

TABELA 4. Obrazy 2D i 3D struktury powierzchni czołowej próbki dla danych grubości warstwy



ŹRÓDŁO: oprac. własne.

TABELA 5. Obraz 3D struktury powierzchni próbki dla danych grubości warstwy

Grubość warstwy [mm]	Wybrane parametry chropowatości powierzchni	Obraz 3D
0,12	$R_a [\mu\text{m}] = 3,52$ $R_a [\mu\text{m}] = 18,84$ $R_a [\mu\text{m}] = 4,37$	
0,20	$R_a [\mu\text{m}] = 8,56$ $R_a [\mu\text{m}] = 36,14$ $R_a [\mu\text{m}] = 9,92$	
0,28	$R_a [\mu\text{m}] = 15,6$ $R_a [\mu\text{m}] = 58,44$ $R_a [\mu\text{m}] = 17,56$	

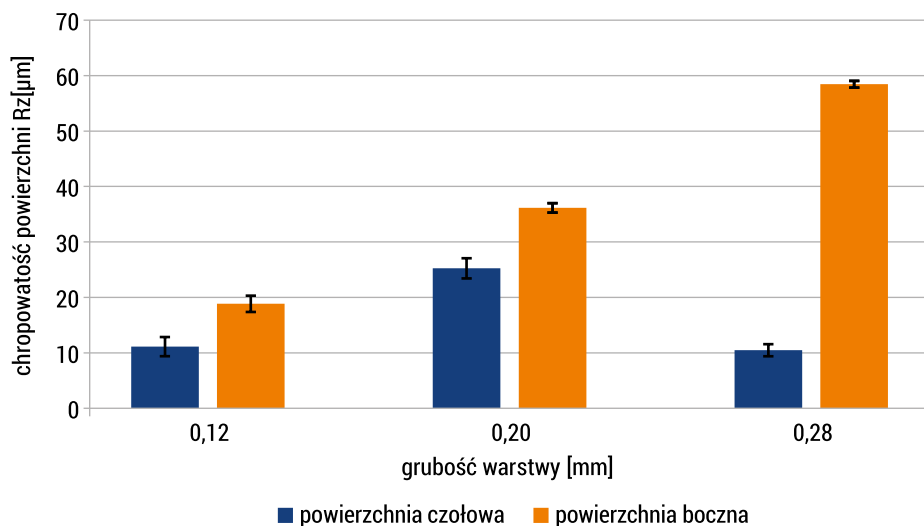
ŹRÓDŁO: oprac. własne.

Na podstawie analizy (tabela 6, wykres 8) stwierdzono tendencję wzrostową chropowatości powierzchni bocznej wraz ze wzrostem grubości warstwy.

TABELA 6. Wartości chropowatości powierzchni czołowej próbek o podanych grubościach warstwy

	0,12 [mm]			0,20 [mm]			0,28 [mm]		
Lp.	Ra [μm]	Rz [μm]	Rq [μm]	Ra [μm]	Rz [μm]	Rq [μm]	Ra [μm]	Rz [μm]	Rq [μm]
1	2,75	9,40	3,04	5,96	26,2	7,41	2,78	11,7	3,36
2	2,38	9,50	2,70	5,15	24,5	6,45	2,18	8,65	2,62
3	2,95	13,4	3,54	6,16	28,3	7,60	3,09	11,5	3,58
4	2,18	10,3	2,60	4,99	24,1	6,29	2,41	10,2	2,91
5	2,91	13,0	3,55	5,02	23,1	6,22	2,81	10,3	3,21
Wartość średnia	2,63	11,12	3,08	5,46	25,24	6,79	2,65	10,47	3,13
Odchylenie standardowe	0,30	1,73	0,40	0,50	1,82	0,58	0,32	1,09	0,33

ŹRÓDŁO: oprac. własne.



WYKRES 8. Wpływ grubości warstwy druku na parametr chropowatość powierzchni

ŹRÓDŁO: oprac. własne.

Uwzględniając odchylenie standardowe, stwierdzono, że rzeczywista chropowatość powierzchni próbek faktycznie zmienia się znacząco wraz ze wzrostem wysokości warstwy.

5. Podsumowanie

Przeprowadzone badania wykazały, że wysokość warstwy elementów drukowanych ma wpływ na ich jakość. Analizując wyniki badań, możemy założyć teoretycznie, że zwiększanie grubości warstwy może wpływać na większą wytrzymałość elementu na rozciąganie. Taka sama sytuacja wystąpiła podczas badania modułu Younga, kiedy wzrost grubości warstwy zwiększał wartość modułu.

Podczas badań wytrzymałościowych zauważono również, że najczęściej próbki pękały w miejscu zakończenia zaokrąglenia. Powodem może być dokładność wykonania samych zaokrągleń.

Wyniki pokazały znaczący wzrost parametrów chropowatości powierzchni bocznej wraz ze wzrostem wysokości warstwy. W przypadku tej powierzchni próbka o wysokości warstwy 0,20 mm charakteryzowała się największą chropowatością. Jednak powierzchnia ta nie jest zależna od wysokości warstwy, więc możemy przyjąć, że wysokość warstwy ma znaczący wpływ na chropowatość powierzchni. Co do powierzchni czołowej można przypuszczać, że oddziałują na to inne czynniki zewnętrzne. Jest to ciekawy aspekt, który może skłaniać do dalszych prac na tym polu.

Analizując wyniki badań porównawczych materiałów PLA i ABS, możemy zaobserwować, że różnice w wytrzymałości oraz w module Younga nie jest znaczące. Jednak należy pamiętać, że drukowanie za pomocą ABS i PLA różni się od siebie.

Literatura

- [1] *A Brief History of 3D Printing*, University of Galway, 2024, <https://openpress.universityofgalway.ie/designingthedigitalworld/chapter/brief-history-3d-printing/> [dostęp: 27.05.2025].
- [2] *Filament PLA: wytrzymałość, temperatura i zalety*, Global 3D, 2020, <https://global3d.pl/pl/blog/filament-pla-wytrzymalosc-temperatura-i-zalety-b32.html> [dostęp: 27.05.2025].
- [3] Kurek A., Żrodowski Ł., Choma T., Abramczyk I., Kłonica M., Wachowski M., *Enhancing Fatigue Performance of Additively Manufactured Ti6Al4V – The Role of Surface Characteristics and Post-Processing Techniques*, „Advances in Science and Technology Research Journal” 2024, vol. 18(6), s. 280–290, <https://doi.org/10.12913/22998624/192114>.
- [4] *Filament PLA bez tajemnic*, F3D, <https://f3dfilament.com/filament-pla-bez-tajemnic> [dostęp: 27.05.2025].
- [5] Filipiak M., Jajczyk J., *Construction and operation of 3D printers*, „Computer Applications in Electrical Engineering” 2015, vol. 13, s. 275–282.
- [6] Wichniarek R., Górski F., Kuczko W., Zawadzki P., Buń P., *Dimensional Accuracy of Parts Manufactured by 3D Printing for Interaction in Virtual Reality*, „Advances in Science and Technology Research Journal” 2017, vol. 11(4), s. 279–285, DOI: 10.12913/22998624/80848.
- [7] Rybarczyk J., Górski F., Kuczko W., Wichniarek R., Siwiec S., Vitkovic N., Păcurar R., *Mechanical Properties of Carbon Fiber Reinforced Materials for 3D Printing of Ankle Foot Orthoses*, „Advances in Science and Technology Research Journal” 2024, vol. 18(4), s. 191–215, <https://doi.org/10.12913/22998624/188819>.
- [8] *Filament ABS bez tajemnic*, F3D, <https://f3dfilament.com/filament-abs-bez-tajemnic> [dostęp: 27.05.2025].

- [9] get3DTeam, *Jak drukować filamentem ABS?*, 2020, <https://get3d.pl/2020/05/27/jak-drukowac-z-abs/> [dostęp: 27.05.2025].
- [10] Zortrax, *Zastosowania*, <https://zortrax.com/pl/applications/> [dostęp: 27.05.2025].
- [11] Budzik G., Woźniak J., Przeszlowski Ł., *Druk 3D jako element przemysłu przyszłości. Analiza rynku i tendencje rozwoju*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej, Rzeszów 2022.
- [12] Niedziałek P.W., Figurski A., Kowalik M.P., *Numerical and Experimental Studies on 3D Printed Compliant Mechanisms in Gripper Applications*, „Advances in Science and Technology Research Journal” 2023, vol. 17(6), s. 228–244, <https://doi.org/10.12913/22998624/174109>.
- [13] Creality store, *Ender-3 3D Printer*, https://store.creality.com/eu/products/ender-3-3d-printer?cfb=bb077575-0b49-4904-826f-e77db5983259&ifb=bb077575-0b49-4904-826f-e77db5983259&scm=search.v111&score=21.005988455988454&ssp=&spm=..search.search_1.1 [dostęp: 27.05.2025].
- [14] 3DGence, *Double P255*, <https://3dgence.com/pl/drukarki-3d/double-p255/> [dostęp: 27.05.2025].

Key words: 3D printing, material strength, surface roughness

Badanie charakterystyk segmentów i pakietu baterii opartych na technologii ogniw litowo-jonowych

Sebastian Niemiec, Jakub Kotra, Paweł Stolarczyk
Koło Naukowe Formuła Student Rzeszów, Politechnika Rzeszowska

1. Wstęp

Sektor motoryzacyjny od początku swojego istnienia przechodził wiele zmian, jednak w ostatnich kilku latach można obserwować jedną z najbardziej znaczących rewolucji w tej gałęzi przemysłu, która związana jest ze stale rosnącą popularnością osobowych pojazdów elektrycznych. Wraz ze wzrostem zapotrzebowania na tego typu pojazdy rosną również znaczenie badań i wytwarzanie rozwiązań w zakresie efektywnych, długotrwałych i niezawodnych źródeł energii elektrycznej, zdolnych do ich zasilania w trakcie eksploatacji. Należy jednak zauważyć, iż rozwiązania wykorzystujące podobne lub w wielu aspektach identyczne elementy można też spotkać w mikromobilności, w postaci skuterów czy hulajnóg elektrycznych, w środkach transportu publicznego – autobusy, pociągi, ale także w stacjonarnych magazynach energii elektrycznej, np. przy panelach fotowoltaicznych.

Obecnie jednym z najpopularniejszych i najbardziej niezawodnych rozwiązań jest budowa pakietów baterii, zwanych bateriami trakcyjnymi, z zestawu identycznych lub podobnych do siebie segmentów, które z kolei są wytwarzane z odpowiednio połączonych ze sobą ogniw litowo-jonowych. Pakiet taki zabezpieczony jest Systemem zarządzania baterią (ang. *Battery Management System*) o odpowiednio dobranym stopniu zaawansowania, którego zadaniem jest monitorowanie parametrów, takich jak: temperatura ogniw, napięcia na ogniwach czy też pobierany z nich prąd, na podstawie których steruje systemami zabezpieczeń, kontroluje proces ładowania i eksploatację całej baterii.

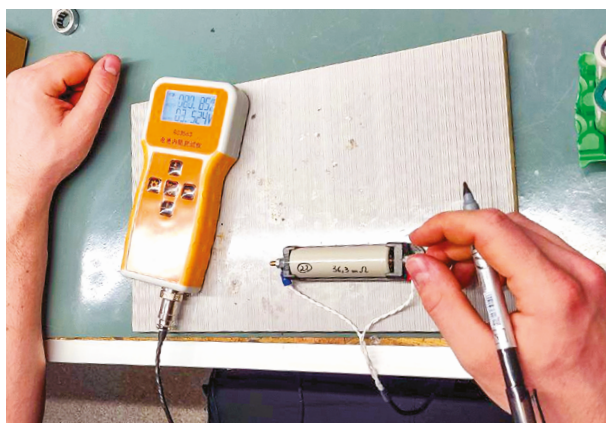
W kontekście sportów motorowych, a w szczególności w klasyfikacji elektrycznej Formuły Student do podstawowych wymaganych przez przemysł motoryzacyjny cech baterii trakcyjnych dochodzą odpowiednie zbilansowanie masy i pojemności oraz strategia ładowania gwarantująca stosunkowo szybkie i przede wszystkim wyrównane naładowanie wszystkich ogniw budujących baterię. Dlatego w badaniu sprawdzano

zachowanie się zarówno poszczególnych segmentów, jak i całego pakietu w trakcie ładowania zadaniem napięciem i natężeniem prądu, a także w czasie rozładowywania stałym obciążeniem.

Głównymi celami badań były sprawdzenie poprawności wykonania połączeń pomiędzy ogniwami oraz sprawdzenie poprawności i porównanie działania dwóch różnych systemów zarządzania baterią z wykorzystaniem wyznaczonych rzeczywistych charakterystyk wytworzonych segmentów i pakietu.

2. Przygotowanie elementów do badań

Każdy z segmentów, które zostały poddane badaniom, został przygotowany identycznie pod względem technologicznym. W pierwszym etapie pomierzone zostały impedancje wszystkich ogniw przeznaczonych do wykorzystania do budowy pakietu w celu określenia ich ułożenia w poszczególnych segmentach zapewniającego minimalizację różnic w parametrach. W kolejnym kroku przygotowano komponenty łączące ogniwa w postaci wyciętych laserem blach miedzianych o grubości 0,2 mm oraz pasków niklowo-żelazowych o grubości 0,12 mm, docinanych na wymiar do konkretnego połączenia. Po dokładnym wyczyszczeniu łączonych powierzchni na ogniwach oraz blachach i umieszczeniu ogniw w wydrukowanych mocowaniach przystąpiono do zgrzewania segmentów. Po wykonaniu wszystkich połączeń w odpowiednich punktach zamocowano termistory do pomiaru temperatury i przewody do pomiaru napięć, które podłączono do uprzednio polutowanych układów podrzędnych systemów BMS.



FOT. 1. Pomiar pojedynczego ogniwa

ŹRÓDŁO: oprac. własne.



FOT. 2. Segment typu II w trakcie zgrzewania

ŹRÓDŁO: oprac. własne.

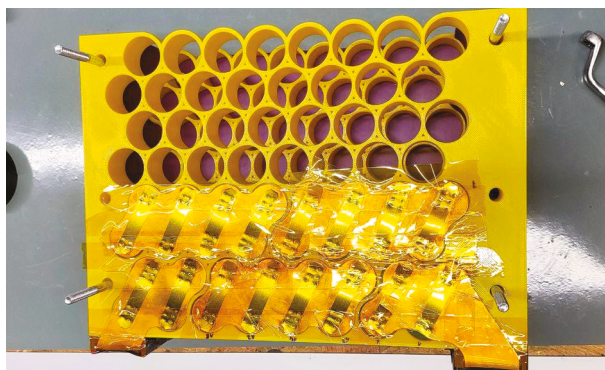
3. Elementy poddawane badaniom

Do realizacji badań wytworzono segmenty o dwóch różnych konfiguracjach, dalej zwane typami I i II, oraz pełen pakiet baterii zbudowany z ośmiu identycznych segmentów typu II połączonych szeregowo.

Segment typu I (fot. 3) zbudowano z 32 ogniw Molicel INR 21700-P42A połączonych w konfigurację 8S4P – osiem połączeń szeregowych, cztery równoległe – co przełożyło się na parametry:

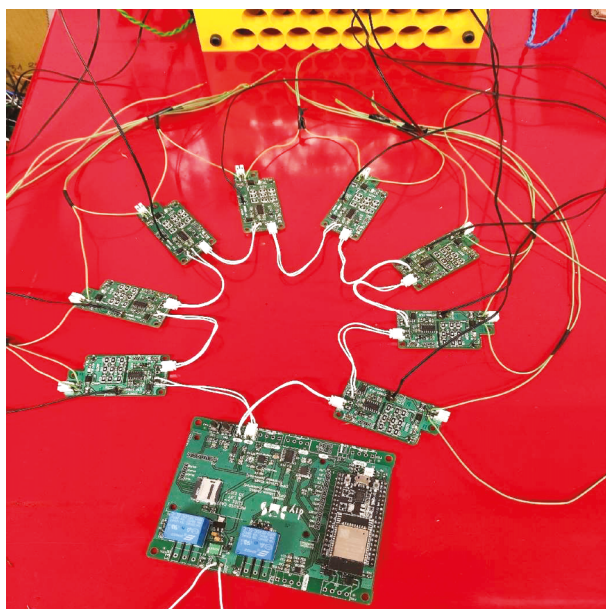
- maksymalne napięcie znamionowe: 33,6 V,
- maksymalne natężenie prądu rozładowania: 180 A,
- pojemność całkowita: 16,8 Ah / 0,5645 kWh.

Ten typ segmentu został wykorzystany do porównania działania innego niż autor-ski System zarządzania baterią, ponieważ użyto w nim odpowiednio dostosowanego otwartoźródłowego projektu, „DIY BMS” (fot. 4), oraz do sprawdzenia poprawności wykonania połączeń po wstępnym dobraniu parametrów zgrzewania. Zastosowany system ma sieciowy interfejs użytkownika pozwalający na podgląd parametrów segmentu, a logowanie danych pomiarowych odbywa się przez zapis plików .csv na karcie pamięci umieszczonej w układzie nadrzędnym systemu.



FOT. 3. Segment typu I po zgrzaniu

ŹRÓDŁO: oprac. własne.



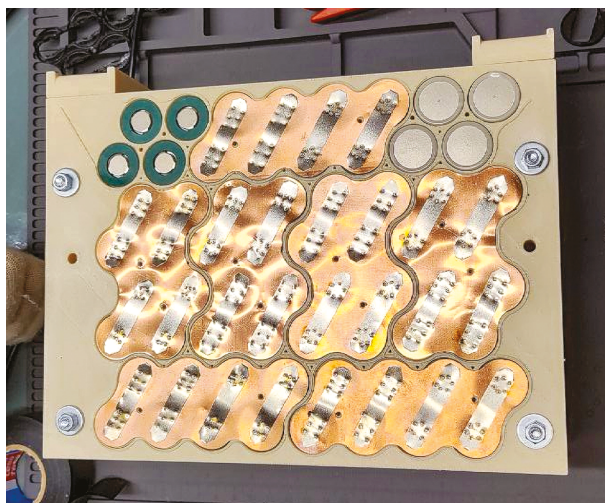
FOT. 4. System „DIY BMS” spięty w konfiguracji dla segmentu typu I

ŹRÓDŁO: oprac. własne.

Segmenty typu II (fot. 5) zostały dopracowane na podstawie wyników badań otrzymanych z segmentów typu I. Składają się one z 64 ogniw Molicel INR 21700-P42A zgrzanych w konfigurację 16S4P – szesnaście połączeń szeregowych, cztery równoległe. Budowa taka zapewniła segmentowi parametry na poziomach:

- maksymalne napięcie znamionowe: 67,2 V,
- maksymalne natężenie prądu rozładowania: 180 A,
- pojemność całkowita: 16,8 Ah / 1,129 kWh.

Segmenty te zostały wyposażone w autorski system BMS wytworzony na podstawie architektury „Master-Slave”, w której na każdym segmencie montowany jest jeden układ podrzędny odpowiedzialny za pomiary temperatur i napięć na ogniwach, a następnie spinany jest on z kolejnymi układami, tworząc pętlę zamkniętą. Logowanie i podgląd danych w tym systemie możliwe są przez wpisy wyświetlane w konsoli komputera podpiętego do układu nadrzędnego, zapisanie ich do pliku .txt i zaimportowanie do programu do analizy danych, takiego jak Matlab R2023b. Przy podpięciu do magistrali komunikacyjnych pojazdu system ma możliwość wyświetlania parametrów baterii na ekranie kierowcy i zapisywania danych w pamięci flash.



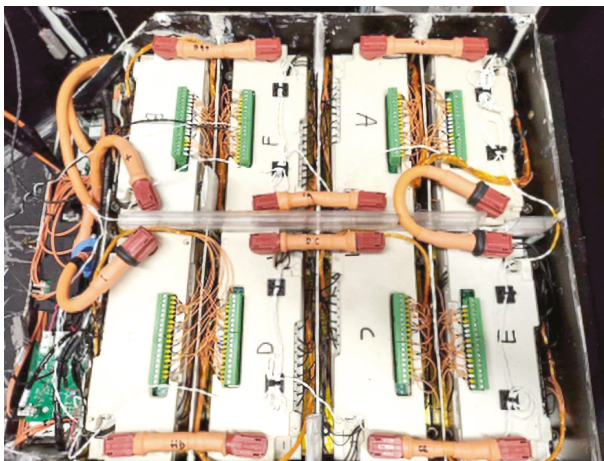
FOT. 5. Segment typu II po zgrzaniu większości ogniw

ŹRÓDŁO: oprac. własne.

Pełen pakiet baterii systemu trakcyjnego (fot. 6) zbudowano z ośmiu połączonych szeregowo segmentów typu II, co przełożyło się na użycie 512 ogniw Molicel INR 21700-P42A w konfiguracji całkowitej 128S4P. Zapewniła ona pełnej baterii następujące parametry znamionowe:

- maksymalne napięcie znamionowe: 537,6 V,
- maksymalne natężenie prądu rozładowania: 180 A,
- pojemność całkowita: 16,8 Ah / 9,032 kWh.

Podobnie jak w przypadku pojedynczego segmentu typu II, pełen pakiet zabezpieczony jest autorskim Systemem zarządzania baterią składającym się z ośmiu układów podrzędnych i jednego nadrzędnego. Logowanie i podgląd danych realizowane są identycznie jak opisano przy powyższych segmentach.



FOT. 6. Pełen pakiet baterii zamontowany w obudowie

ŹRÓDŁO: oprac. własne.

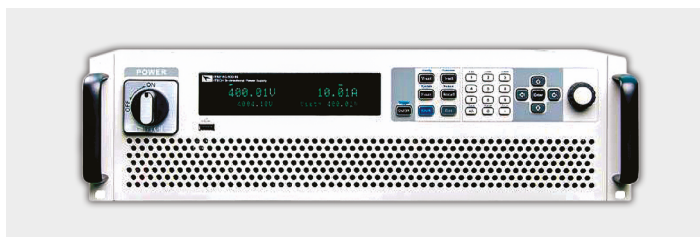
4. Metodyka badań

Badanie polegało na weryfikacji rzeczywistych parametrów wytworzonych segmentów i całego pakietu baterii (z uwzględnieniem użycia dwóch odmiennych Systemów zarządzania baterią) za pomocą wyznaczonych charakterystyk ładowania oraz rozładowywania poszczególnych elementów. Zarówno segmenty, jak i pełen pakiet baterii poddawane były wielokrotnym cyklom rozładowywania i pełnego ładowania, co pozwoliło na wyznaczenie:

- charakterystyk temperaturowych segmentów,
- charakterystyk napięciowych segmentów,
- rozkładu temperatur na układach podrzędnych w trakcie trwania balansowania.

Powtarzalność parametrów prądu ładującego i rozładowującego poszczególne elementy gwarantowała zastosowanie dwukierunkowego zasilacza laboratoryjnego dużej mocy ITECH IT6006C-800-25 (fot. 7). W czasie rozładowania zasilacz działał w trybie obciążenia prądem stałym, jednakże napięcie źródła zostało ustawione na minimalne napięcie badanego pakietu, co umożliwiło osiągnięcie jednostajnego poziomu obciążenia dla elementów badanych oraz wyznaczenie realnej pojemności pakietu.

Badania odbywały się w odizolowanym, klimatyzowanym pomieszczeniu, na stanowisku pokrytym matami elektroizolacyjnymi z atestem do 1 kV. Dodatkowo osoby przeprowadzające pomiary wyposażone były w środki ochrony indywidualnej, w tym kaski i kurtki chroniące przed łukiem, oraz narzędzia przeznaczone do pracy przy wysokim napięciu, w celu maksymalizacji bezpieczeństwa osobistego i materialnego.

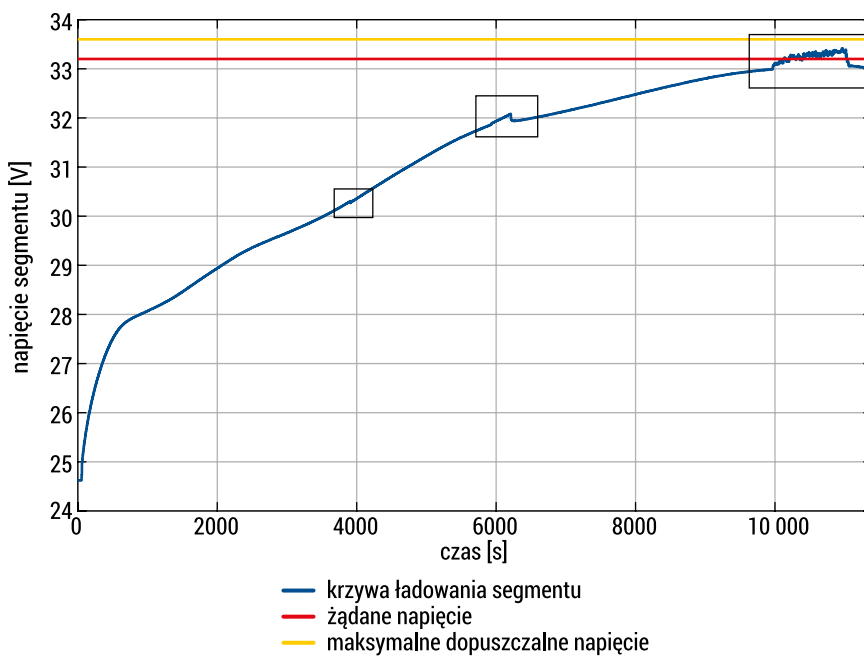


FOT. 7. Zasilacz dwukierunkowy ITECH IT6006C-800-25

ŹRÓDŁO: <https://ndn.com.pl/pl/zasilacze-duzych-mocy/5123-itech-it6006c-800-25-programowany-dwukierunkowy-zasilacz-dc-6-kw-800-v-25-a-seria-it-6000c.html> [dostęp: 28.05.2025].

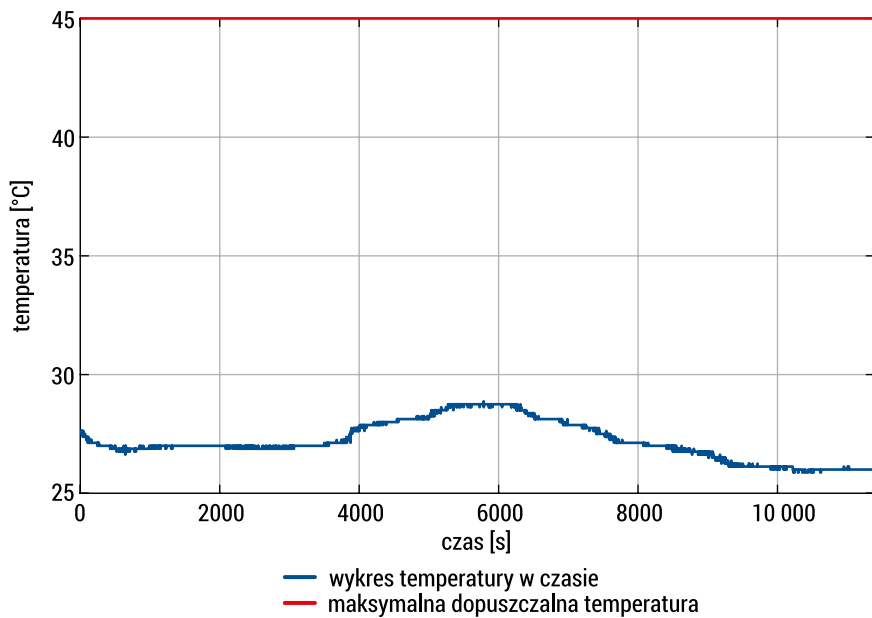
5. Wyniki badań

Dla segmentu typu I otrzymano następujące charakterystyki.



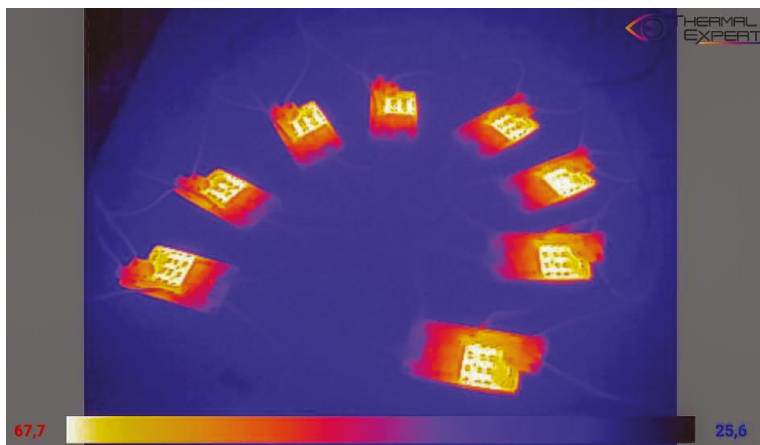
WYKRES 1. Charakterystyka napięciowa ładowania segmentu typu I

ŹRÓDŁO: oprac. własne.



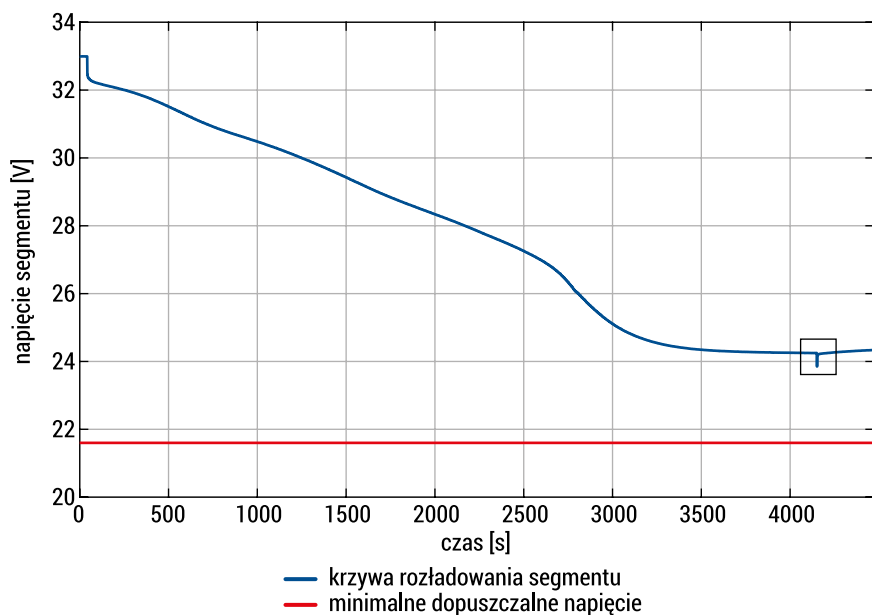
WYKRES 2. Charakterystyka temperaturowa ładowania segmentu typu I

ŹRÓDŁO: oprac. własne.



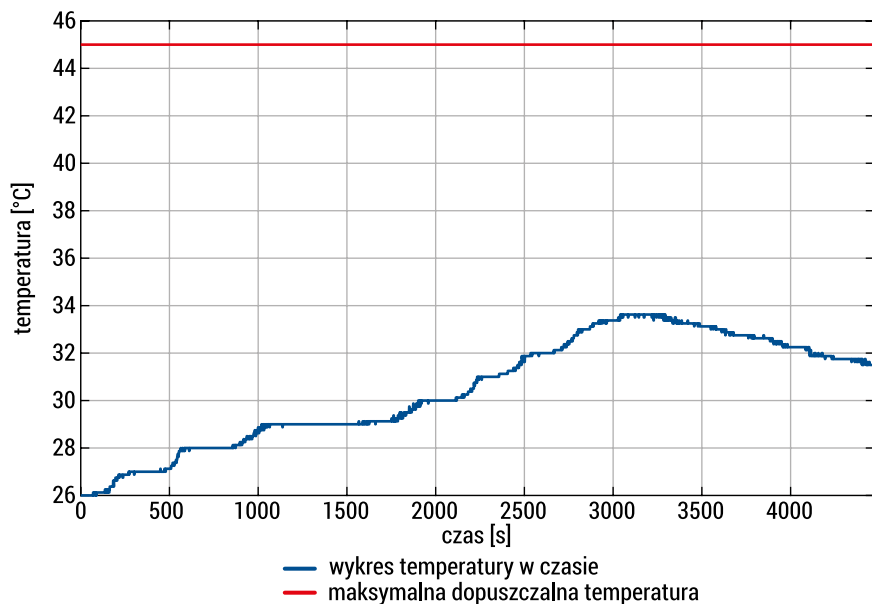
FOT. 8. Rozkład temperatur na układach podrzędnych w trakcie balansowania segmentu typu I

ŹRÓDŁO: oprac. własne.



WYKRES 3. Charakterystyka napięciowa rozładowania segmentu typu I

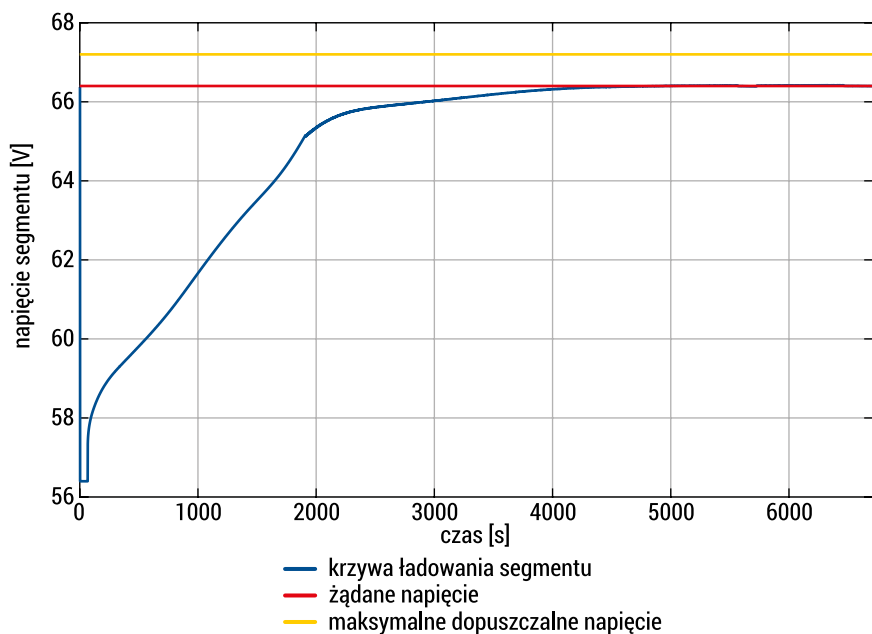
ŹRÓDŁO: oprac. własne.



WYKRES 4. Charakterystyka temperaturowa rozładowania segmentu typu I

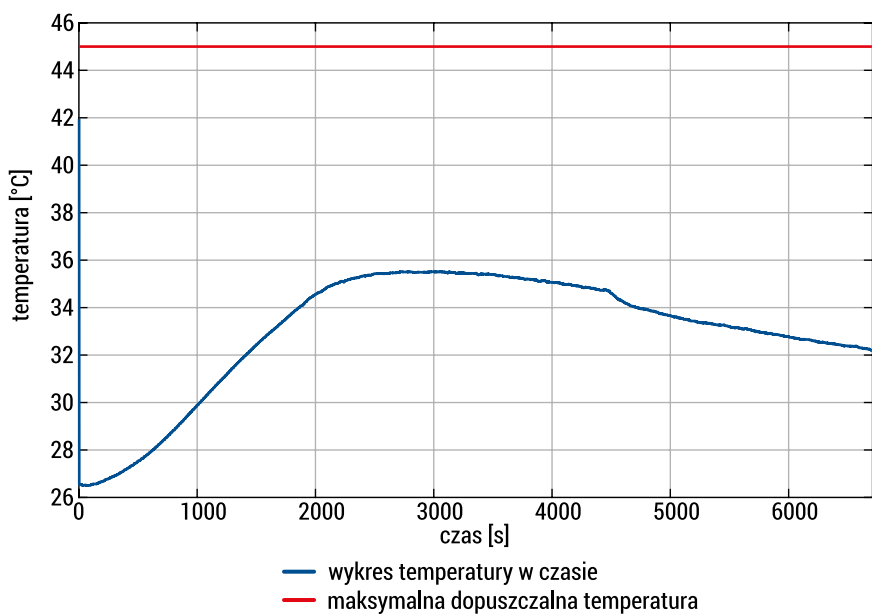
ŹRÓDŁO: oprac. własne.

Dla segmentu typu II otrzymano następujące charakterystyki.



WYKRES 5. Charakterystyka napięciowa ładowania segmentu typu II

ŹRÓDŁO: oprac. własne.



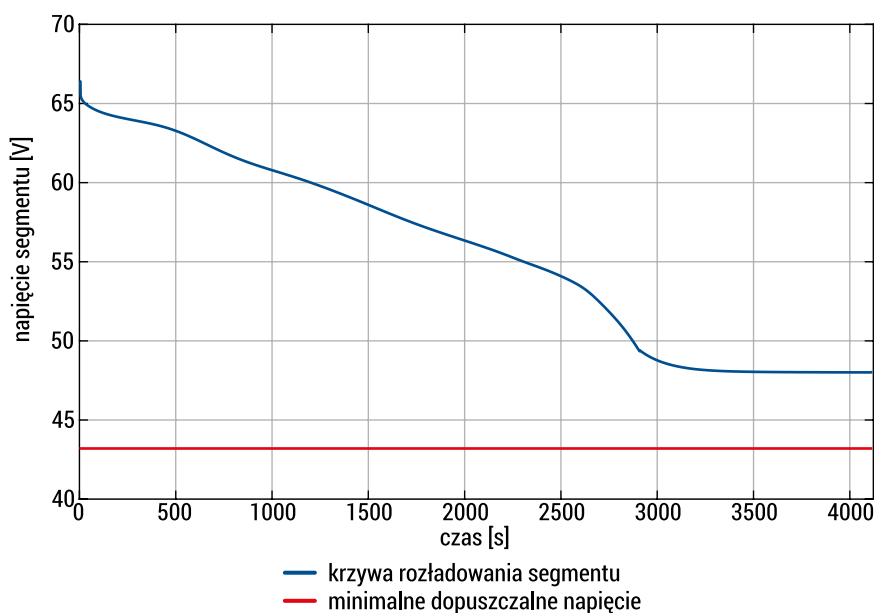
WYKRES 6. Charakterystyka temperaturowa ładowania segmentu typu II

ŹRÓDŁO: oprac. własne.



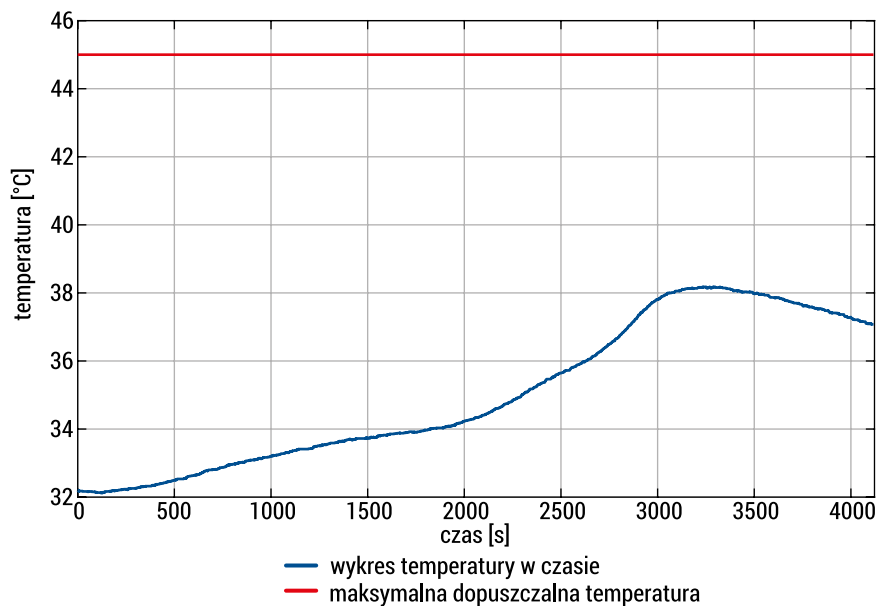
FOT. 9. Rozkład temperatur na układach podrzędnych w trakcie balansowania segmentu typu II

ŹRÓDŁO: oprac. własne.



WYKRES 7. Charakterystyka napięciowa rozładowania segmentu typu II

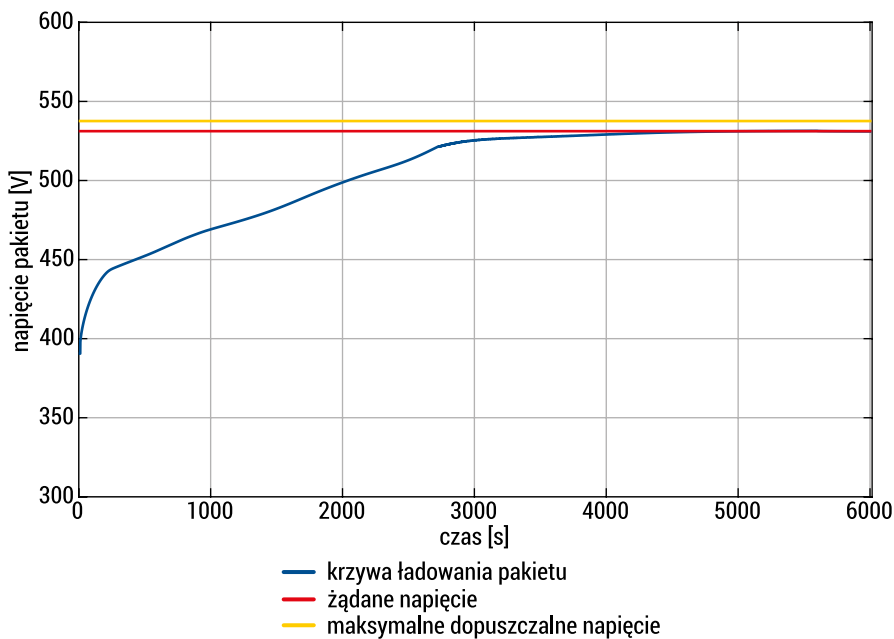
ŹRÓDŁO: oprac. własne.



WYKRES 8. Charakterystyka temperaturowa rozładowania segmentu typu II

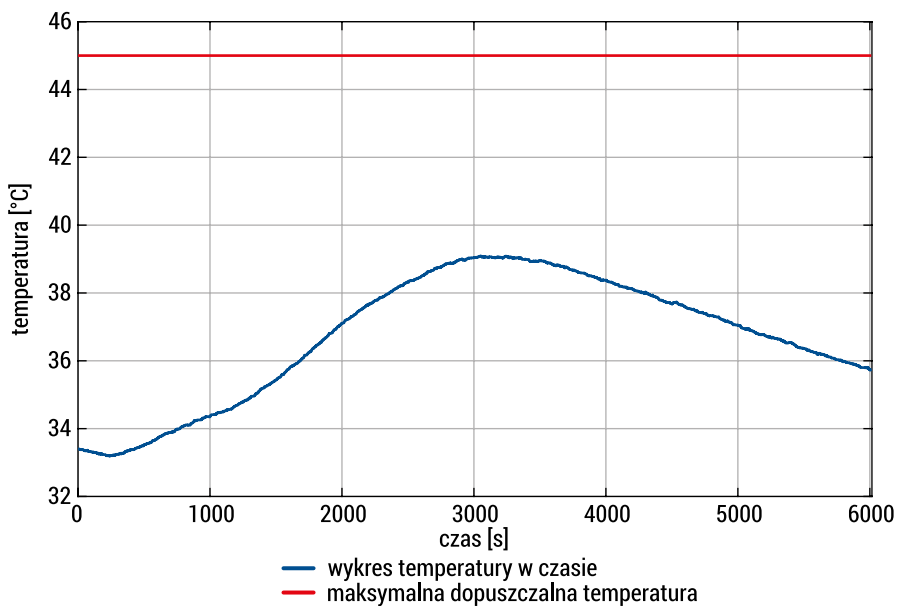
ŹRÓDŁO: oprac. własne.

Dla pełnego pakietu otrzymano następujące charakterystyki.



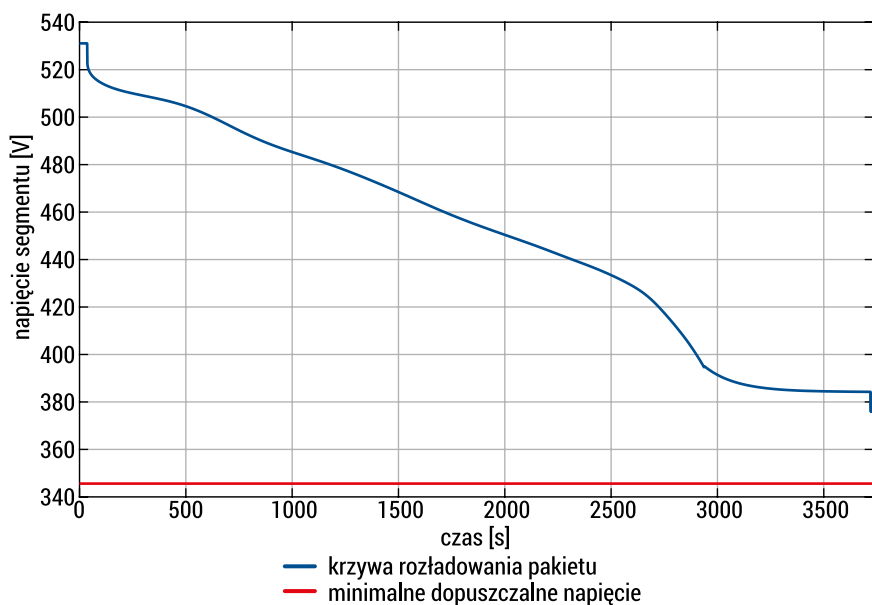
WYKRES 9. Charakterystyka napięciowa ładowania pełnego pakietu

ŹRÓDŁO: oprac. własne.



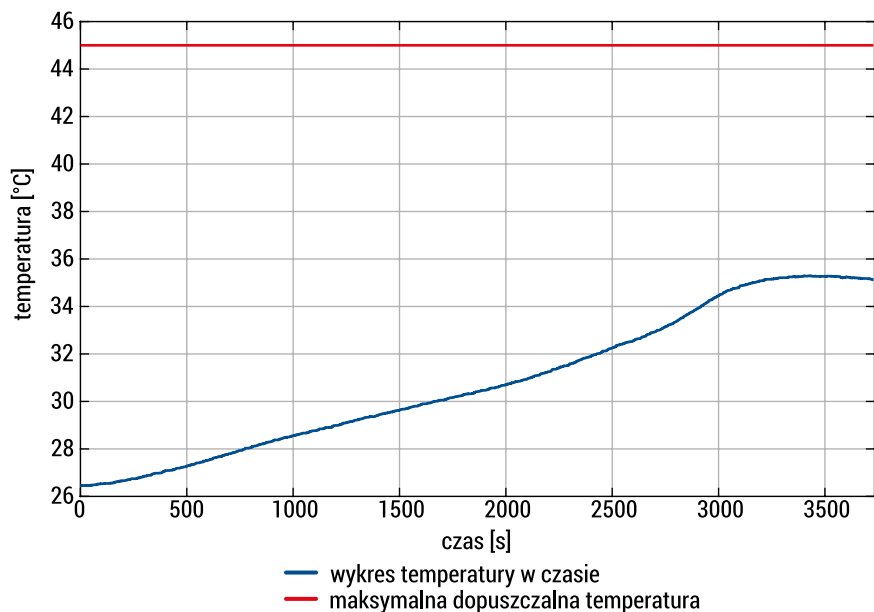
WYKRES 10. Charakterystyka temperaturowa ładowania pełnego pakietu

ŹRÓDŁO: oprac. własne.



WYKRES 11. Charakterystyka napięciowa rozładowania pełnego pakietu

ŹRÓDŁO: oprac. własne.



WYKRES 12. Charakterystyka temperaturowa rozładowania pełnego pakietu

ŹRÓDŁO: oprac. własne.

TABELA 1. Wyniki pomiarów przy ładowaniu elementów badanych

Nazwa parametru	Jednostka	Segment I	Segment II	Pakiet
Maksymalne napięcie dopuszczalne	[V]	33,600	67,200	537,600
Napięcie żądane po naładowaniu	[V]	33,200	64,400	531,200
Napięcie maksymalne w trakcie ładowania	[V]	33,416	66,420	531,390
Napięcie osiągnięte po naładowaniu	[V]	33,020	66,398	531,042
Maksymalne napięcie osiągnięte względem dopuszczalnego	[%]	99,452	98,839	98,449
Napięcie osiągnięte po naładowaniu do żądanego	[%]	99,458	99,997	99,970
Maksymalna temperatura dopuszczalna	[°C]	45,000	45,000	45,000
Temperatura maksymalna w trakcie ładowania	[°C]	28,875	41,956	39,089
Temperatura osiągnięta po naładowaniu	[°C]	26,000	32,200	35,744
Temperatura maksymalna osiągnięta do dopuszczalnej	[%]	64,167	93,235	86,864
Temperatura osiągnięta po naładowaniu do dopuszczalnej	[%]	57,778	71,556	79,432

Nazwa parametru	Jednostka	Segment I	Segment II	Pakiet
Temperatura maksymalna na układzie balansującym	[°C]	67,700	110,600	–
Temperatura maksymalna dopuszczalna dla PCB	[°C]	135,000	135,000	135,000
Temperatura maksymalna PCB do dopuszczalnej PCB	[%]	50,148	81,926	–
Czas ładowania	[h]	3,163	1,862	1,670

ŹRÓDŁO: oprac. własne.

TABELA 2. Wyniki pomiarów przy rozładowywaniu elementów badanych

Nazwa parametru	Jednostka	Segment I	Segment II	Pakiet
Minimalne napięcie dopuszczalne	[V]	21,600	43,200	345,600
Napięcie minimalne osiągnięte w trakcie rozładowania	[V]	23,852	48,006	375,796
Napięcie osiągnięte po rozładowaniu	[V]	24,337	48,025	383,713
Minimalne napięcie osiągnięte względem dopuszczalnego	[%]	112,671	111,169	111,028
Maksymalna temperatura dopuszczalna	[°C]	60,000	60,000	60,000
Temperatura maksymalna w trakcie rozładowania	[°C]	33,625	38,178	35,289
Temperatura osiągnięta po rozładowaniu	[°C]	31,500	37,078	35,133
Temperatura maksymalna osiągnięta do dopuszczalnej	[%]	56,042	63,630	58,815
Temperatura po rozładowaniu do dopuszczalnej	[%]	52,500	61,769	58,556
Czas rozładowywania	[h]	1,241	1,436	1,036

ŹRÓDŁO: oprac. własne.

6. Podsumowanie i wnioski

Celem badań było sprawdzenie, czy wytworzone segmenty, cały pakiet baterii i autorski system zarządzania zostały wykonane poprawnie i działają zgodnie z założeniami. Dodatkowo porównano działanie autorskiego systemu zarządzającego z ogólnodostępnym rozwiązaniem mającym podobne możliwości. Ze względu na przeznaczenie opracowanego rozwiązania – zastosowanie jako źródło energii w elektrycznym bolidzie klasy Formula Student – wymagania stawiane całemu układowi dotyczą minimalizacji czasu i stabilności ładowania, nawet kosztem podwyższonych temperatur

ogniwi, pod warunkiem że nie przekraczają one wartości bezpiecznych deklarowanych przez producenta.

Na podstawie otrzymanych wyników można określić, iż wytworzone segmenty, a dokładniej połączenia pomiędzy ogniwami zostały wykonane poprawnie, ponieważ w czasie kontrolowania stanu segmentów z wykorzystaniem kamery termowizyjnej nie zaobserwowano lokalnych koncentracji emitowanego ciepła. Gdyby połączenie ogniwi było wykonane niepoprawnie, w trakcie ładowania segmenty mogłyby nie osiągnąć żądanej wartości napięcia ze względu na niecałkowite ładowanie ogniwi.

Z uzyskanych charakterystyk i parametrów w późniejszych etapach projektu całego pojazdu możliwe było nastawienie bardziej wymagających dla pakietu map momentu obrotowego w sterowniku falowania, ponieważ przy rozładowywaniu całego pakietu baterii nie osiągnęła ona nawet 60% bezpiecznej dopuszczalnej wartości temperatury. Zmiany takie pozytywnie przełożyły się na ogólne osiągi zbudowanego pojazdu.

Porównując wyniki otrzymane z autorskiego systemu zarządzania i otwartoźródłowego systemu, można zauważyć, iż pierwszy z nich w znacznie większym stopniu wykorzystywał dostępne środki zarówno w procesie ładowania, jak i rozładowywania. System ten osiągał wyższe poziomy naładowania w krótszym czasie, jednocześnie zachowując znacznie większą stabilność nie tylko w krytycznym etapie balansowania, lecz także w całej charakterystyce. Należy podkreślić, że zachowania poziomu napięcia widoczne na wykresie 1 mogą być niezwykle niebezpieczne dla żywotności ogniwi ze względu na możliwość trwałej zmiany ich parametrów lub ich uszkodzenie.

Dzięki przeprowadzonym badaniom możliwe było zwalidowanie budowanej baterii systemu trakcyjnego do pierwszego bolidu elektrycznego klasy Formula Student tworzonego przez zespół. Wśród możliwości rozwojowych badanych elementów można wymienić: przebudowę układu balansującego z pasywnego na aktywny, potencjalne zmniejszenie pojemności baterii przy zachowaniu optymalnych parametrów do konkurencyjnej jazdy bolidu oraz podniesienie efektywności zgrzewania przy zachowaniu ich jakości.

Literatura

- [1] Koech A.K., Mwandila G., Mulolani F., *A review of improvements on electric vehicle battery*, „Heliyon” 2024, t. 10(15), e34806.
- [2] Liu W., Placke T., Mulolani F., *Overview of batteries and battery management for electric vehicles*, „Energy Reports” 2022, t. 8, s. 4058–4084.
- [3] FSG, Regulamin zawodów „Formula Student Germany”, www.formulastudent.de/fsg/rules/ [dostęp: 20.11.2024].
- [4] Molicel, Dokumentacja produktu INR-21700-P42A, www.molicel.com/wp-content/uploads/INR21700P42A-V4-80092.pdf [dostęp: 16.11.2024].
- [5] Analog Devices, Dokumentacja produktu LTC6813-1, <https://www.analog.com/en/products/ltc6813-1.html#part-details> [dostęp: 15.11.2024].

Key words: batteries, cells, battery management systems, formula student

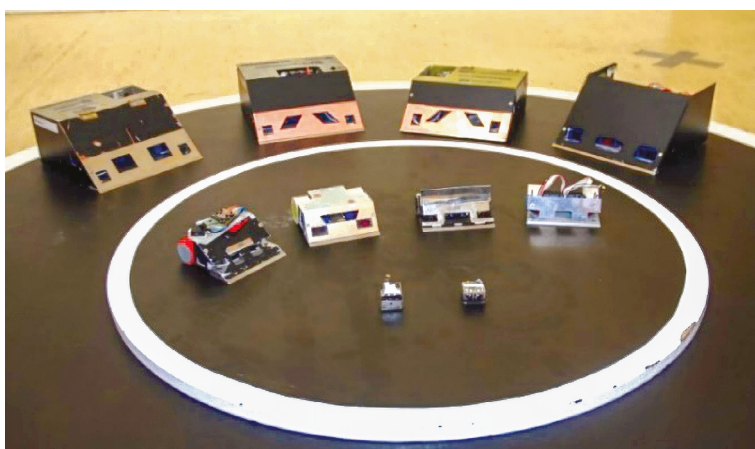
Przegląd badań i innowacji zastosowanych w autonomicznych robotach mobilnych klasy Sumo

Szymon Migowski, Grzegorz Muczko, Norbert Waśkiewicz, Rafał Grądzki
Koło Naukowe Robotyków, sekcja SumoMasters, Politechnika Białostocka

1. Wstęp

Roboty Sumo to autonomiczne maszyny zaprojektowane do rywalizacji w zawodach Sumo, które imitują tradycyjne japońskie zapasy. Celem takiego robota jest wypchnięcie przeciwnika z ringu (dohyō), przy jednoczesnym przestrzeganiu określonych reguł i zasad ustalanych według konkretnych regulaminów konkretnych zawodów. Są popularne w edukacji i zawodach robotów, ponieważ łączą aspekty mechaniki, elektroniki i programowania.

Roboty dzielą się na kilka kategorii: MegaSumo, Sumo, MiniSumo, NanoSumo (fot. 1). Różnią się między sobą wymiarami, wagą oraz wielkością i materiałem ringu, po którym się poruszają.

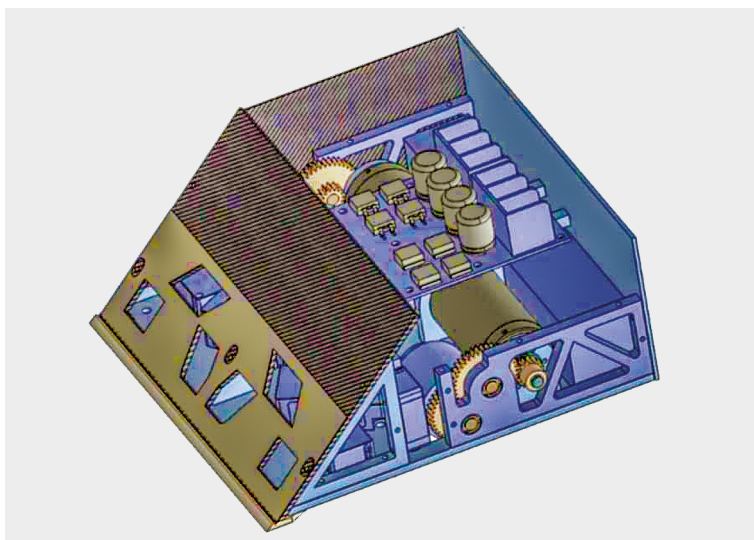


FOT. 1. Kategorie robotów Sumo

ŹRÓDŁO: oprac. własne.

Autonomiczny robot Sumo jest integralnym systemem współpracujących ze sobą układów mechanicznych i elektrycznych (rys. 1). Można w nich wyszczególnić:

- konstrukcję nośną zawierającą zarówno mocowania, jak i system przełożenia napędu na moment obrotowy kół łączących robota z ringiem;
- zestaw czujników służących do zlokalizowania przeciwnika;
- silniki i napędy sprzężone z kołami, będące systemem wprawiającym w ruch całą maszynę;
- jednostkę sterującą, która jest kontrolerem bazującym na wiadomościach przekazanych z systemu czujników i decydującym o reakcjach robota;
- zasilanie, najczęściej w postaci pakietów baterii/akumulatorów dostarczających energię elektryczną do zasilania silników i układów elektrycznych;
- oprogramowanie, które odpowiada za autonomiczne decyzje robota podczas walk.



RYS. 1. Widok robota MegaSumo w programie SolidWorks

ŹRÓDŁO: oprac. własne.

Skoordynowanie wszystkich podzespołów tak, by współpracowały ze sobą, jest niekiedy trudnym zadaniem. Warunkują to zależne od kategorii robota rozmiar i masa maszyny.

2. Badania prowadzone nad autonomicznymi robotami Sumo

W ciągu ostatnich sześciu lat zespół prowadził wiele badań odnoszących się do autonomicznych robotów Sumo. Możemy podzielić je na dwie grupy – elektronikę i mechanikę. Jeśli chodzi o elektronikę, były to badania dotyczące możliwości przeciążonych

silników oraz specyfikacji czujników stosowanych w poszczególnych klasach robotów Sumo, w mechanice natomiast skupiono się zarówno na metodach i układach wykorzystania magnesów i elektromagnesów w podstawach robotów, jak i idei zastosowania składanego ostrza robota.

3. Elektronika

W rozdziale opisano przegląd badań, które dotyczyły wpływu obciążenia na zmiany temperaturowe uzwojenia silnika, oraz omówiono działanie różnych rodzajów czujników stosowanych w robotach Sumo.

3.1. Badania zmian temperatur obciążonego silnika prądu stałego

W publikacji [2] badaniom symulacyjnym zostały poddane silniki Maxon Motor RE40 150W 24V (zasymulowane w programie Matlab/Simulink) pod kątem zmian ich temperatury pracy przy obciążeniu. Do modelu wprowadzono informacje wejściowe, takie jak napięcie sterowania, moment obciążający oraz rezystancje. Układ był poddawany czterem rodzajom obciążeń, swobodna jazda – badanie bez obciążenia, zwarcie z przeciwnikiem, zmiana kierunku obrotów oraz zderzenia robotów.

W przypadku pierwszego obciążenia dostarczano różne napięcia zasilające (10,5 V, 21 V, 31,5 V oraz 42 V). Jednak mimo tego na wykresach odnotowano jedynie niewielkie różnice.

Podczas poddawania obciążeniu wynikającemu ze zmian kierunku obrotów silników dla niższych napięć wyniki ukazały, że wzrost temperatur jest łagodniejszy i mniej gwałtowny niż w przypadku wyższych napięć. Stwierdzono też, że różnica w wygenerowanej temperaturze między tymi wartościami wynosi około 50°C. Wartość temperatury po 30 s pracy silników wykazała możliwość uszkodzenia uzwojeń.

Walka w zwarcie jest ważna w przypadku robotów Sumo. Następuje wtedy, gdy roboty zaczynają się przepychać na ringu, a to powoduje duże obciążenia silników. Temperatury graniczne zostały osiągnięte po 7,5 s. Potwierdzono, że walka w zwarcie szybciej nagrzewa silniki, ale podane napięcia sterowania nie mają wpływu na ich temperaturę.

Podczas ostatniego obciążenia zasymulowano pięć uderzeń robota w czasie 10 s. Uderzenia w walce są bardzo częste i powodują wyhamowanie robota i ponowną jego akcelerację. Podczas zderzenia można zauważyć gwałtowny wzrost temperatury, ale nie osiąga ona wartości krytycznej. Po ustąpieniu kolizji robotów temperatura uzwojeń maleje.

3.1.1. Wnioski

Największe ryzyko dla silników Maxon Motor RE40 wynika z nagrzewania uzwojeń, szczególnie podczas gwałtownych zmian prędkości obrotowej w walkach robotów. Praca silnika dłuższa niż 20 s może prowadzić do przekroczenia temperatury granicznej i trwałego uszkodzenia. Ograniczenia prądowe akumulatorów i mostka sterującego pomagają zmniejszyć ryzyko uszkodzeń, redukując maksymalne natężenie prądu w uzwojeniach. Pomiar temperatury uzwojeń jest niemożliwy z zewnątrz, dlatego ochrona silnika opiera się na monitorowaniu prądu oraz modelach symulacyjnych, które umożliwiają szacowanie stanu silnika. Choć symulacje nie odwzorowują idealnie rzeczywistych warunków, pozwalają przewidzieć potencjalne problemy. Decyzje o kontynuacji walki lub zmianie taktyki powinny opierać się na wynikach symulacji i pomiarów, aby uniknąć uszkodzeń napędu.

3.2. Testy wybranych czujników laserowych

3.2.1. Dedykowane robotom MegaSumo

W publikacji [3] przeprowadzono badania skupiające się na właściwościach czujników: Omron E3Z-D82, Wenglor sensoric OY2P303A0135 oraz Pepperl+Fuchs ML100-8-1000, w zmiennych kątach nachylenia oraz odległościach od 100 do 1000 mm. Do testów skonstruowano specjalne stanowisko badawcze umożliwiające dokładne pozycjonowanie czujników i obiektów oraz sterowanie kątami nachylenia w dwóch osiach – pionowej i poziomej.

Stanowisko obejmowało liniał do ustalania odległości, serwomechanizmy do zmiany kątów oraz system akwizycji danych, dzięki czemu możliwe było precyzyjne ustawianie powierzchni testowej względem wiązki czujnika. Pomiarów dokonano w warunkach normalnego oświetlenia (mieszanek światła fluorescencyjnego i rozproszonego naturalnego). Próbkę wykonywano co 100 mm w zakresie wyżej wymienionych odległości oraz dla zakresu kątów od -45° do 45° w osi poziomej oraz od 0° do 50° w osi pionowej, z krokiem co 5° , na trzech różnych powierzchniach: białej, czarnej i odbijającej.

Wyniki dla białej powierzchni wskazały najlepsze specyfikacje spośród badanych sensorów w czujnikach firmy Wenglor, charakteryzowały się one detekcją w pełnym zakresie odległości i kątów. Następne klasyfikowały się czujniki Omron, które miały ograniczenie detekcji przy większych kątach ($>30^\circ$). Najgorzej zaś wypadł Pepperl+Fuchs, przy czym dalsze zwiększanie kątów skutkowało spadkiem odległości detekcji.

W przypadku czarnej powierzchni detekcja klasyfikowała się podobnie. Wenglor rejestrował powierzchnie do 200 mm dla większych kątów. Powyżej tej wartości zdolność detekcji ograniczała się wraz ze spadkiem kąta. Omron wykazał rejestrację do 500 mm, ale dla kątów nieprzekraczających 20° . Pepperl+Fuchs wypadł najgorzej przez brak wykrycia powyżej kąta 25° .

Podobnie było w przypadku powierzchni odbijającej, w której Wenglor osiągnął najlepsze wyniki, bo wykrywał do 400 mm dla kąta nachylenia mniejszego niż 20°. Czujniki Omron miały ograniczoną detekcję do 300 mm przy kątach większych od 30°. Sensory Pepperl+Fuchs wykazały podobne wyniki do czujników Omron, a nawet nieco lepsze.

We wszystkich badaniach najlepsze wyniki osiągnął czujnik Wenglor, którego cena spośród badanych jest najwyższa. Omron jest bardziej uniwersalnym wyborem pod względem stosunku jakości do ceny, jednak odbiega swoją precyzją od firmy Wenglor.

3.2.2. Dedykowane robotom MiniSumo

W publikacji [7] przeprowadzono badania trzech najczęściej stosowanych czujników implementowanych w autonomicznych robotach MiniSumo: Keyence PZ-G41N, Wenglor PIKY004 oraz TSOP34438. Testy przeprowadzono na specjalnie opracowanym stanowisku, które umożliwiało ocenę ich skuteczności na powierzchniach o analogicznych cechach jak w MegaSumo.

Pomiarom podlegały odległość oraz kąty nachylenia powierzchni w dwóch osiach. Zakres testowanego dystansu wynosił do 80 cm (średnica ringu w MiniSumo ma 77 cm), a zmiany odległości dokonywano co 5 cm.

Stanowisko badawcze pozwalało na dokładne pozycjonowanie testowanej powierzchni w pionie i poziomie za pomocą serwomechanizmów. Pomiarom poddano zdolność detekcji analogicznych cech powierzchni i kątów jak w testach czujników do MegaSumo. Wyniki rejestrowano co 500 ms, aby wyeliminować wpływ wibracji i zapewnić stabilność pomiarów.

W przypadku białej powierzchni porównywalną skuteczność wykazały czujniki Wenglor i Keyence, które wykrywały ją we wszystkich testowanych pozycjach i odległościach. Sensor TSOP działał najgorzej, rozpoczynając detekcję dopiero od 600 mm.

Na czarnej powierzchni czujnik Wenglor wykazał największą skuteczność, zasięg do 800 mm i szeroki zakres kątów. Sensor TSOP miał ograniczoną skuteczność, wykrywał powierzchnię jedynie na krótkich dystansach. Keyence wypadł pośrodku.

W przypadku powierzchni odbijającej również najskuteczniejszy okazał się czujnik Wenglor, zachowując największy zakres detekcji. Sensor TSOP miał najsłabszą skuteczność przy większych kątach nachylenia.

Podsumowując, czujniki Keyence i Wenglor były podobnie skuteczne na białej powierzchni i wykrywały ją w całym zakresie testów. Sensor TSOP34438 działał zaś najgorzej, zaczynając detekcję dopiero od 600 mm. Wyniki dla pozostałych powierzchni pokazały różnice w efektywności w zależności od materiału i kąta, co wskazuje na ograniczenia poszczególnych czujników w specyficznych warunkach.

3.2.3. Dedykowane robotom NanoSumo

Celem artykułu [8] było porównanie dwóch laserowych czujników odległości – Pololu 2490 (VL53L0X) oraz Pololu 2489 (VL6180X) – pod kątem ich przydatności w autonomicznych robotach NanoSumo. Testy dotyczyły ich pola widzenia (FOV), a także

możliwości detekcji w warunkach odwzorowujących rzeczywiste środowisko walki tych robotów.

Stanowisko pomiarowe obejmowało dwa ekrany, które poruszały się w osiach X i Y za pomocą szyn prowadzących oraz silników krokowych. Sensor był umieszczony na stałe, a zmienne pozycje ekranów pozwalały określić pole widzenia czujników. Maksymalny zakres pomiarów wynosił 172 mm od czujnika w osi X oraz 50 mm w osi Y. Testy przeprowadzono na białych powierzchniach ekranu, które najlepiej odbijają światło, co pozwoliło uzyskać optymalne warunki pomiarowe.

Czujnik VL6180X charakteryzuje się asymetrycznym polem widzenia, które dla krótkich odległości wynosi maksymalnie 21° po lewej stronie i 23° po prawej. Wraz ze wzrostem odległości od ekranu kąt widzenia stopniowo się zmniejsza, osiągając minimalne wartości na końcu zakresu pomiarowego. Zauważono, że prawa strona pola widzenia czujnika jest nieco szersza niż lewa, co dodatkowo podkreśla jego asymetryczną charakterystykę.

Czujnik VL53L0X wyróżnił się asymetrycznym kątem widzenia, który osiąga maksymalnie 16° po lewej stronie i jedynie 6° po stronie prawej. Pole widzenia przyjmuje kształt regularnego stożka, jednak z prawej strony jest wyraźnie ograniczone, szczególnie przy krótkich odległościach. Ta asymetria wynika z konstrukcji sensora, w której odbiornik jest umieszczony po lewej stronie obudowy, co wpływa na nierównomierne rozłożenie kąta widzenia.

Oba czujniki są kompaktowe i odpowiednie do NanoSumo dzięki małym wymiarom. Czujnik VL6180X okazał się bardziej efektywny dzięki szerszemu polu widzenia i mniejszym martwym strefom. Jego pole widzenia jest lepsze w układach ukośnych, dzięki czemu lepiej wykrywa przeciwników. Czujnik VL53L0X cechuje się węższym polem widzenia i większą martwą strefą, ale może być użyteczny w układach równoległych.

3.2.4. Wnioski

W wyniku przeprowadzonych badań zdecydowano, że roboty MegaSumo i MiniSumo będą wyposażane w czujniki firmy Wenglor ze względu na ich wysoką precyzję wykrywania obiektów o różnych cechach powierzchni oraz wszechstronności zastosowania podczas walki. W robotach kategorii NanoSumo zdecydowano się na zastosowanie czujników VL6180X, które mają mniejszą martwą strefę zakresu widzenia.

4. Mechanika

W rozdziale opisano przegląd badań, które dotyczyły wpływu stosowania różnych ilości i układów magnesów w podstawach robotów. Rozpatrzono również wpływ zastosowania elektromagnesu na system magnetyczny robota.

4.1. Badania wpływu ułożenia magnesów na siłę przyciągania robota do maty

Publikacja [6] omawia badania nad systemami układu magnesów w podstawie robota. Testom poddano układy macierzy Halbacha oraz układ naprzemiennej polaryzacji. Symulacje przeprowadzono z zastosowaniem oprogramowania COMSOL Multiphysics. W badaniach rzeczywistych wykorzystano maszynę wytrzymałościową MTS 858 Table Top System.

Ułożenie magnesów w układzie Halbacha wykazało blisko 1,5-krotnie większe siły przyciągania robota do metalowej maty względem metody układu naprzemiennego ułożenia biegunów magnesów. Wyniki te uzyskano zarówno przy stu, jak i dwustu magnesach w podłodze robota. Układ dwustu magnesów macierzy Halbacha miał ponad 2600 N siły przyciągania względem naprzemiennego układu osiągającego 1590 N.

4.2. Badanie wpływu rozłożenia magnesów na zdolności przyciągania robota do metalowej maty

Badania opisane w publikacji [5] obejmowały zakres analizy rozkładu magnesów neodymowych na powierzchni podstawy robota. Celem było znalezienie najwydajniejszego układu, w którym magnesy zapewnią podczas starcia najlepsze właściwości przyciągania do metalowej maty. Autorzy tego artykułu przeprowadzili badania symulacyjne z zastosowaniem oprogramowania COMSOL Multiphysics, a rzeczywiste z wykorzystaniem maszyny wytrzymałościowej MTS 858.

Sprawdzono trzy układy: bez separacji, z separacją oraz układ mieszany. Do separacji użyto specjalnych kratek, w które wtopione były magnesy. Badanie potwierdziło zalety szyku nierozdzielonych magnesów i ograniczenie sił przyciągania cechujących strukturę rozdzieloną. Po wcieleniu mieszanej metody połączyły się zalety obu układów. Testy prowadzone były na 184 magnesach o łącznej masie nieprzekraczającej 150 g.

4.3. Badanie użycia elektromagnesu w celu poprawy przyczepności robota do metalowej maty

Obserwacje dotyczące działającej siły przyciągania elektromagnesu opisano w publikacji [4]. Wprowadzenie elektromagnesów do budowy robota miało zwiększyć kontrolę przyciągania robota do ringu. Ich aktywowanie w odpowiednim momencie podczas starcia może doprowadzić do podważenia przeciwnika lub silniejszego przyciągnięcia do ringu. Badanie potwierdziło wzrost przyciągania o 487,38 N przy zasileniu elektromagnesu, co odpowiada niemal 1,5-krotności bazowej siły przyciągania robota z tym samym ułożeniem magnesów. Pole magnetyczne nie wpływa na podzespoły elektroniczne, gdyż nie rozchodzi się poza niewielki obszar działania elektromagnesu.

4.4. Wnioski

Badania magnesów pozwoliły na zoptymalizowane wykorzystanie pola magnetycznego przy tej samej masie magnesów. Dzięki elektromagnesom możliwa była implementacja chwilowego większego docisku robota do metalowej maty.

5. Podsumowanie

Badania przeprowadzone w ramach prac nad autonomicznymi robotami Sumo wykazały istotne innowacje w obszarze mechaniki i elektroniki. W szczególności analizowano wpływ rozkładu magnesów oraz zastosowania elektromagnesów na zdolność przyciągania robota do metalowej maty, a także przeprowadzono testy temperatur pracy silników DC w różnych warunkach obciążenia. Wyniki potwierdziły, że kontrolowane użycie elektromagnesów może znacząco poprawić stabilność robota na ringu, a właściwe monitorowanie temperatury uzwojeń silnika jest kluczowe dla zachowania ich żywotności.

Dodatkowo testy czujników laserowych uwydatniły różnice w skuteczności detekcji w zależności od rodzaju powierzchni oraz kąta nachylenia. Ustalono, że czujniki Wenglor są najbardziej efektywne w szerokim zakresie zastosowań, co może mieć kluczowe znaczenie dla poprawy precyzji nawigacji.

Łącząc wyniki tych badań, możliwe jest dalsze optymalizowanie konstrukcji robotów sumo, aby zwiększyć ich konkurencyjność w zawodach.

Wnioski te są wynikiem wieloletnich badań zespołu, a ich implementacja przyczynia się do postępu w dziedzinie robotyki mobilnej.

Literatura

- [1] Wasilewski P., Klimowicz M., Grądzki R., *Design and analysis of state vector modulation based brushless motor driver*, „AIP Conference Proceedings” 2018, vol. 2029, 020078, <https://doi.org/10.1063/1.5066540>.
- [2] Dziubek M., Klimowicz M., Grądzki R., *Evaluation of temperature changes of a loaded DC motor in autonomous mobile robots*, [w:] *20th International Carpathian Control Conference. ICCO, Krakow-Wieliczka, 26–29 May 2019*, IEEE, DOI: 10.1109/CarpathianCC.2019.8766058.
- [3] Pawłow B., Wysocki M., Grądzki R., *Performance examination of selected sensors for use in autonomous robots*, „AIP Conference Proceedings” 2018, vol. 2029, 020055, <https://doi.org/10.1063/1.5066517>.
- [4] Dziubek M., Falkowski M., Łapińska P., Grądzki R., *Research of Hybrid Magnetic System Used in Autonomous MegaSumo Robots*, „International Journal of Mechanical Engineering and Robotics Research” 2021, vol. 10(6), s. 343–348.
- [5] Kotarski Ł., Wysocki M., Grądzki R., Łapińska P., *Research of magnetic system applied in autonomous MegaSumo robots*, [w:] *20th International Carpathian Control Conference. ICCO, Krakow-Wieliczka, 26–29 May 2019*, IEEE, DOI: 10.1109/CarpathianCC.2019.8765950.

- [6] Łapińska P., Dziubek M., Kotarski Ł., Grądzki R., *Research of various magnetic systems used in autonomous MegaSumo robots*, „International Journal of Mechanical Engineering and Robotics Research” 2020, vol. 9(5), s. 739–744.
- [7] Święcki M., Szymelewicz J., Matusiewicz J., Grądzki R., *Tests of Selected Sensors Applicable in Autonomous Mini Sumo Robots*, „International Journal of Mechanical Engineering and Robotics Research” 2020, vol. 9(8), s. 1145–1151.
- [8] Święcki M., Szymelewicz J., Matusiewicz J., Grądzki R., *Tests of Useful Field of View of Laser Sensors Used in Autonomous Nano Sumo Robots*, „International Journal of Mechanical Engineering and Robotics Research” 2021, vol. 10(8), s. 414–421.

Key words: autonomous robot, motor, sensor, magnets, robot sumo

Wykorzystanie sprzętu medycznego oraz technologii immersyjnych do badań przestrzeni zbudowanej

*Natalia Makowska, Klaudia Lewko, Patrycja Matyś, Anna Sikora
Immersja – Dostępna Rzeczywistość, Politechnika Rzeszowska*

1. Wstęp

Planowanie i projektowanie przestrzeni zbudowanej opierają się na analizie uwarunkowań przestrzennych w skalach ogólnych i miejscowych [8]. Ważnymi elementami składowymi tych uwarunkowań są kontekst miejsca oraz zapewnienie potrzeb użytkowników. Sposoby badań przestrzeni i świadomość złożoności problematyki projektowania ludzkiego habitatu zmieniały się z biegiem czasu. Dopiero rewolucja przemysłowa z XVIII wieku (1.0) spowodowała zmianę w myśleniu o warunkach życia ludzi [9], a kwestie szeroko pojętego bezpieczeństwa zamieszkania w mieście i jego dostępności określono na początku XX wieku [4].

Obecnie w okresie postglobalizacji [3] i rewolucji przemysłu 4.0 i 5.0 [2] badania i analizy przestrzeni zbudowanej opierają się zarówno na elementach tradycyjnych, takich jak inwentaryzacje terenowe i ich zapis techniczny (planistyczny lub architektoniczno-budowlany), dokumentacja zdjęciowa, szkice, pomiary odległości itd., jak i innowacyjnych metodach łączących technologie immersyjne i specjalistyczny sprzęt, w tym medyczny i pomiarowy.

Celem naukowym artykułu jest przedstawienie badań własnych koła naukowego Immersja – Dostępna Rzeczywistość działającego na Politechnice Rzeszowskiej oraz wynikających z nich diagnoz i najważniejszych wniosków. Celem aplikacyjnym jest wskazanie kierunków działania w obszarze inwestycyjnym z uwzględnieniem innowacyjnych metod i technologii. Analizy zróżnicowanego środowiska zbudowanego przeprowadzono z wykorzystaniem metod eksperymentalnych o charakterze immersyjnym.

2. Starzejące się społeczeństwo

Spółeczeństwo świata zachodniego starzeje się bardzo szybko, a osoby powyżej 60. roku życia stanowią coraz większy procent populacji. Równocześnie osoby dotknięte różnymi rodzajami niepełnosprawności chcą korzystać z przestrzeni i poruszać się w niej bez przeszkód. Te przeobrażenia się nasilają, co powoduje zmiany społeczne widoczne w wielu dziedzinach życia, w tym architekturze, urbanistyce oraz projektowaniu krajobrazu i terenów zielonych [1, 14]. Wraz z rosnącym odsetkiem seniorów zmienia się struktura demograficzna miast, co wymaga dostosowania przestrzeni zbudowanej do ich potrzeb. Kluczowym wyzwaniem jest eliminacja barier architektonicznych, które ograniczają mobilność i aktywność użytkowników na każdym etapie życia [7]. Częste zmaganie się z utrudnieniami w przestrzeni miejskiej prowadzi do wykluczenia społecznego, obniżenia jakości życia i pogorszenia zdrowia psychicznego [10]. Grupa społeczna seniorów nie jest jedyną, która wymaga specjalnego podejścia. Projektanci przestrzeni – zarówno w skali makro (co leży w gestii planowania przestrzennego), jak i w skali mikro – muszą również brać pod uwagę potrzeby osób neuroatypowych i dotkniętych chorobami degeneracyjnymi [5].

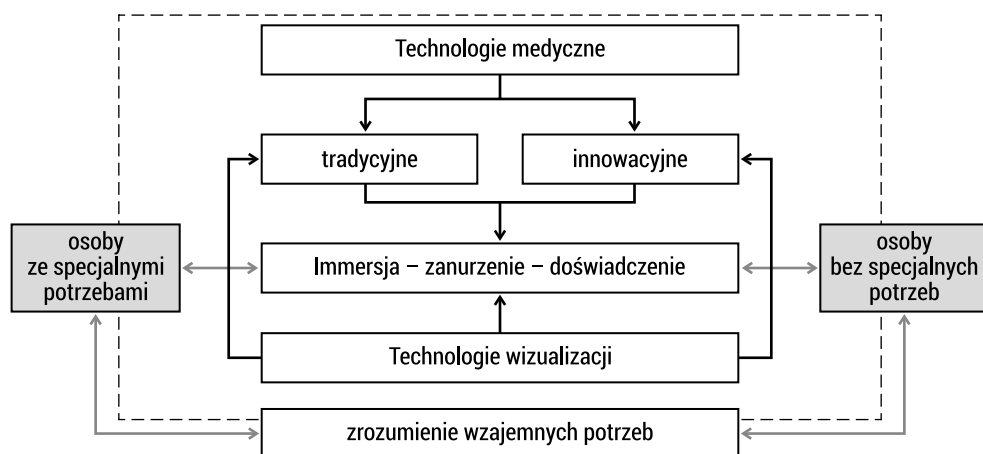
W miastach i innych jednostkach osadniczych konieczne jest wprowadzenie rozwiązań zwiększających dostępność przestrzeni zbudowanej, takich jak optymalnie zaprojektowane elementy komunikacji pionowej i poziomej: chodniki, ścieżki, windy, rampy, schody czy przystanki komunikacji miejskiej [12]. Ważne jest także właściwe dostosowanie budynków o różnych funkcjach, ze szczególnym uwzględnieniem tych mieszkalnych [8]. Zmiany w strukturze społecznej i zróżnicowana długość życia kobiet i mężczyzn spowodowały, że wiele osób, głównie kobiet, mieszka samotnie w budynkach, których warunki techniczne nie odpowiadają zmieniającym się potrzebom fizycznym i zdrowotnym [11].

Nowoczesne technologie, w tym symulatory starzenia, wirtualna rzeczywistość czy sprzęt medyczny, mogą odegrać kluczową rolę w diagnozowaniu i eliminowaniu barier. Dzięki tym narzędziom możliwe jest lepsze zrozumienie trudności, jakie napotykają użytkownicy przestrzeni, oraz projektowanie, które sprzyja samodzielności, aktywności i dobrostanowi. Działania te nie tylko poprawiają komfort życia, lecz także wspierają integrację ze społeczeństwem, pomagając przystosować się do zmieniającego się świata.

3. Idea integracji technologii medycznych i immersyjnych

Integracja technologii medycznych i immersyjnych polega na połączeniu istniejących fizycznie urządzeń przeznaczonych dla osób ze specjalnymi potrzebami, w szczególności z niepełnosprawnością, z technologią wizualizacji immersyjnej oraz innowacyjnym sprzętem technicznym wspomagającym analizę i diagnozę, a także funkcjonowanie w środowisku wymagającym takich przyrządów.

Na rys. 1 wskazano zależności pomiędzy poszczególnymi grupami interesariuszy: osób ze specjalnymi potrzebami oraz tych, którym bez immersji, czyli fizycznego zanurzenia i doznania problemów w funkcjonowaniu, trudno je zrozumieć. Integracja technologii jest szczególnie ważna dla projektantów przestrzeni zbudowanej – architektów i urbanistów, ale też projektantów wnętrz i inżynierów wzornictwa.



RYŚ. 1. Idea integracji teorii medycznych

ŹRÓDŁO: oprac. własne.

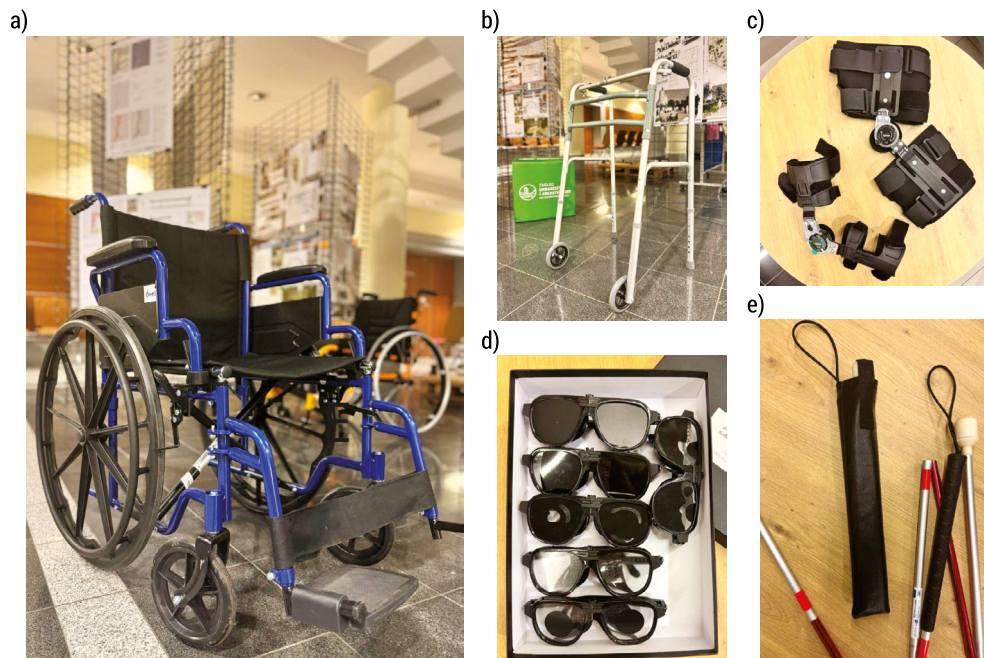
4. Badania środowiska zbudowanego

Współcześnie ludzie spędzają w budynkach 90% doby. Ten rodzaj funkcjonowania stawia nowe wyzwania dla architektów, którzy zobowiązani są tworzyć projekty obiektów i przestrzeni publicznych spełniające kryteria zapewnienia zdrowia i dobrostanu mieszkańców miast. Budynki pełnią nie tylko funkcję schronienia, lecz także są miejscem pracy, odpoczynku i interakcji społecznych. Jednak długotrwałe przebywanie w zamkniętych pomieszczeniach może prowadzić do problemów zdrowotnych, takich jak otyłość, niedobory witaminy D, problemy z oddychaniem czy wzrost poziomu stresu.

Badania środowiska zbudowanego koncentrują się na analizie wpływu tych przestrzeni na zdrowie i samopoczucie użytkowników. Wykorzystanie technologii immersyjnych, takich jak wirtualna i rozszerzona rzeczywistość, oraz technologii medycznych, a także systemów monitorowania jakości powietrza czy skanerów 3D pozwala na kompleksowe diagnozowanie problemów w przestrzeniach zamkniętych. Przykładem może być symulowanie interakcji użytkowników z przestrzenią w celu identyfikacji barier, które ograniczają ich aktywność lub komfort.

Członkowie koła naukowego Immersja w swych badaniach wykorzystują aparaturę pracowni komputerowej Urban and Architecture BIM [19] oraz Laboratorium

Projektowania Uniwersalnego i Inkluzywnego [20]. W zasobach tych znajdują się przede wszystkim urządzenia służące do badań przestrzeni życia człowieka z uwzględnieniem specjalnych potrzeb [17]. Są to wózki inwalidzkie (bierne i aktywne) oraz różne sprzęty poprawiające funkcjonowanie osób z dysfunkcją narządów ruchu: chodziki, laski i kule inwalidzkie, ortezy itp. Używane są również symulator starości, symulator ciąży oraz otyłości. W celu analizy przestrzeni pod kątem użytkowania przez osoby z dysfunkcją wzroku stosowane są okulary ograniczające widoczność i symulujące wady i choroby oczu oraz opaski zasłaniające widzenie (fot. 1).



FOT. 1. Urządzenia medyczne wykorzystane do badań własnych przestrzeni zbudowanej. Sprzęty znajdują się na wyposażeniu Laboratorium Projektowania Uniwersalnego i Inkluzywnego (LabUI) KUA, WBiŚiA, PRz

OZNACZENIA: a) wózek inwalidzki, b) chodzik, c) ortezy, części symulatora starości, d) okulary symulujące dysfunkcje wzroku, e) laska dla osób niewidomych i niedowidzących

ŹRÓDŁO: materiały własne.

W celu połączenia technik mieszanych do badań środowiska zbudowanego wykorzystuje się również gogle VR (fot. 2) wraz z oprogramowaniem. Podstawowym narzędziem są aplikacje symulujące modele 3D przestrzeni zbudowanej, w tym umożliwiające swobodne poruszanie się oraz przedstawianie przedmiotów lub wskazywanie ich położenia. Intuicyjnym oprogramowaniem architektoniczno-urbanistycznym, które może być podstawą aplikacji, jest środowisko CAD, używa się także programów wykorzystywanych do budowy modeli i ich wizualizacji [13, 15, 16].



FOT. 2. Urządzenia VR wykorzystywane do badań własnych przestrzeni zbudowanej – Meta Quest 3 wraz z soczewkami korekcyjnymi

ŹRÓDŁO: [18].

5. Podsumowanie

Odpowiednio zaprojektowane budynki, przestrzenie publiczne, takie jak parki czy zielone tarasy, odgrywają kluczową rolę w przeciwdziałaniu negatywnym skutkom życia we współczesnym świecie. Dostęp do natury, zgodnie z zaleceniami Światowej Organizacji Zdrowia, powinien być priorytetem w planowaniu miast, ponieważ wpływa pozytywnie na zdrowie fizyczne i psychiczne mieszkańców, jednocześnie redukuje zanieczyszczenie powietrza i hałas. Projektowanie wysokiej jakości środowiska zbudowanego musi zatem uwzględniać równowagę między przestrzeniami zamkniętymi a otwartymi, promować aktywność fizyczną i integrację społeczną.

Technologie medyczne i immersyjne mogą być kluczowym narzędziem w rozwiązywaniu wyzwań urbanizacyjnych i zdrowotnych mieszkańców miast. Przyrządy medyczne, takie jak monitory jakości powietrza, systemy monitorujące parametry zdrowotne czy metody obrazowania 3D, umożliwiają precyzyjne analizowanie środowiska zbudowanego pod kątem wpływu na zdrowie użytkowników. Jednocześnie technologie immersyjne pozwalają na symulowanie i testowanie projektowanych przestrzeni, co zwiększa ich funkcjonalność i zgodność z potrzebami mieszkańców.

Połączenie tych produktów otwiera nowe możliwości w projektowaniu miast przyszłości. Na przykład systemy obrazowania 3D mogą analizować strukturę budynków pod kątem ergonomii i bezpieczeństwa, a narzędzia VR umożliwiają użytkownikom doświadczenie przestrzeni jeszcze przed jej powstaniem. To innowacyjne podejście nie tylko wspiera tworzenie bardziej przyjaznych środowisk, lecz także zwiększa zaangażowanie społeczeństwa w proces projektowy, umożliwiając mieszkańcom włączenie się w kształtowanie otaczającej ich przestrzeni. Integracja technologii medycznych i immersyjnych stanowi klucz do projektowania zdrowych, zrównoważonych miast, które odpowiadają na wyzwania współczesności i przyszłości [13, 15, 16].

Literatura

- [1] Boguszevska K.L., *Dostępność historycznych parków*, „Teka Komisji Architektury, Urbanistyki i Studiów Krajobrazowych” 2016, nr 2, s. 15–26.
- [2] Kaczmar-Kolny E., Pośpiech W., *Analiza rozwoju technologii w kontekście przemysłu 4.0 i 5.0*, [w:] *Inżynieria produkcji 2023. Zaawansowane metody i narzędzia inżynierii przemysłowej*, red. J. Matuszek, I. Kutschenreiter-Praszkiewicz, Wydawnictwo Naukowe Uniwersytetu Bielsko-Bialskiego, Bielsko-Biała 2023, s. 53–68.
- [3] Kowalczyk S., *Jakie etapy globalizacji przeszedł świat i co z tego wynika*, „Pomorski Thinkletter” 2022, nr 4(11), s. 36–40.
- [4] Kozłowska K., Rybka A., *Interdyscyplinarne wymiary bezpieczeństwa w kształtowaniu przestrzeni zurbanizowanej*, „Zeszyty Naukowe Politechniki Częstochowskiej. Budownictwo” 2017, z. 23, s. 287–293.
- [5] Kwiatkowski B., *Pokoje wyciszeń – współczesne tendencje projektowania*, „Teka Komisji Architektury, Urbanistyki i Studiów Krajobrazowych” 2015, nr 4, s. 42–47.
- [6] Labus A., *Starzejące się społeczeństwa europejskie XXI wieku w koncepcjach odnowy miejskiej*, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2014.
- [7] Martyka A., Sikora A., Figurska-Dudek J., *Architektura i urbanistyka jako czynnik mobilizujący mieszkańców do aktywności fizycznej*, [w:] *Miasto 2.0. Człowiek, przestrzeń, transformacja*, red. M. Piekarski, A. Rybka, A. Sikora, Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej, Rzeszów 2021.
- [8] Oleniacz G., Kokoszka W., Ożóg D., Sikora A., Słowik M., Przesmycka N., Gosk W., *Geośrodowiskowa ocena przydatności terenu do celów budowlanych*, „Materiały Budowlane” 2023, nr 12, s. 47–50.
- [9] Ostrowski W., *Urbanistyka współczesna*, Arkady, Warszawa 1975.
- [10] Przesmycka N., Dmitruk M., *Wybrane aspekty projektowania przestrzeni publicznych z uwzględnieniem potrzeb seniorów*, „Teka Komisji Architektury, Urbanistyki i Studiów Krajobrazowych” 2016, nr 3, s. 13–20.
- [11] Stelmach-Fita B., *Dostosowanie obiektów budowlanych do potrzeb osób niepełnosprawnych*, „Nieruchomości” 2001, nr 8(36).
- [12] Szarata M., Bichajło L., *Dostosowanie organizacji ruchu drogowego i przestrzeni ulic do nowej funkcji na obszarach objętych procesami rewitalizacji*, „Czasopismo Inżynierii Lądowej, Środowiska i Architektury” 2017, z. 64, nr 3/II, s. 335–348.
- [13] Szuliński T., *Rzeczywistość wirtualna w architekturze. Zastosowania i korzyści. Część 3*, „Builder” 2021, nr 7(288), s. 66–68.

- [14] Tomaszek A., *Starzejące się społeczeństwo jako wyzwanie społeczne Polski w perspektywie kilkudziesięciu lat*, [w:] *Problemy społeczne XXI wieku: przegląd badań*, red. J. Jędrzejewska, M. Śliwa, Wydawnictwo Naukowe Tygiel, Lublin 2020, s. 58–71.
- [15] Urbanowicz B., Szuliński T., *Rzeczywistość wirtualna w architekturze. Zastosowania i korzyści*, „Builder” 2020, nr 2(271), s. 26–29.
- [16] Urbanowicz B., Szuliński T., *Rzeczywistość wirtualna w architekturze. Zastosowania i korzyści*. Cz. 2, „Builder” 2021, nr 6(287), s. 53–55.
- [17] Ustawa z dnia 19 lipca 2019 r. o zapewnianiu dostępności osobom ze szczególnymi potrzebami (Dz.U. 2024, poz. 1411).
- [18] meta.com, <https://www.meta.com/pl/> [dostęp: 30.11.2024].
- [19] Pracownia komputerowa Urban and Architecture BIM, <https://zuia.prz.edu.pl/laboratoria/pracownia-komputerowa-urban-and-architecture-bim> [dostęp: 30.11.2024].
- [20] Laboratorium Projektowania Uniwersalnego i Inklusywnego, <https://zuia.prz.edu.pl/laboratoria/laboratorium-projektowania-uniwersalnego-i-inkluzywnego> [dostęp: 30.11.2024].

Key words: immersion, VR technology, architecture, urban planning, accessibility

Badanie okulograficzne emocji związanych ze studenckimi wizualizacjami architektonicznymi

*Rezan Alav, Inka Dziok, Feyza Nur Işık, Kinga Kuźmicka, Alicja Nalewajk,
Michał Ponikwicki, Julia Potapo, Bartosz Śliwecki
Studenckie Koło Naukowe CAVE, Politechnika Białostocka*

1. Wstęp

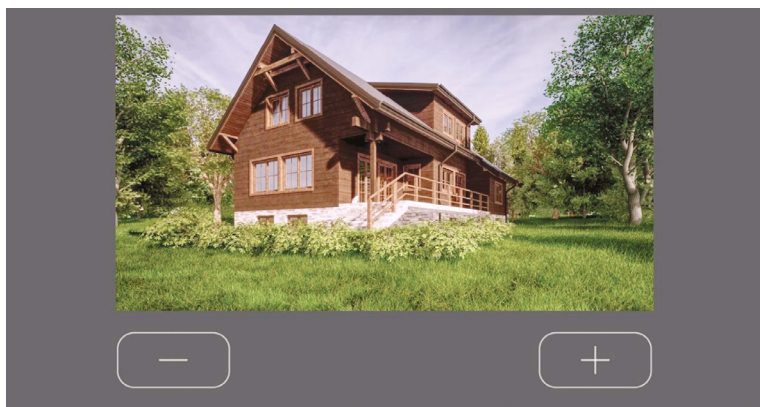
Dyscyplina okulografii (ang. *eye-tracking*) oraz technologie z nią związane rozwijają się w kręgach badawczych od lat siedemdziesiątych i osiemdziesiątych XX wieku. Jest to eksperymentalna metoda rejestrowania ruchu gałek ocznych i położenia wzroku w czasie i podczas wykonywania danego zadania [1]. Analiza ruchu gałek ocznych została uznana za rzetelny przelicznik ludzkiej uwagi, zatem okulografia stała się ważnym elementem badań nad ludzkimi reakcjami na bodźce. Dotychczas kwestia ta poruszana była głównie w psychologii i medycynie, a od czasu rozwoju internetowej prezencji komercyjnej zaczęto wykorzystywać owe technologie w marketingu, np. do analizy kompozycji stron internetowych czy odbioru reklam i opakowań przez konsumentów.

W architekturze znaczenie okulografii ciągle się rozwija. Użycie eye-trackingu może umożliwić lepsze zrozumienie przestrzeni doznawanej przez odbiorcę, ułatwić schemat analitycznego odbioru projektów, wizualizacji architektonicznych i układów funkcjonalnych. Może być również narzędziem przy analizie łączenia obserwacji budynków z ich audioopisami, jak dowiedli tego polscy badacze w Łodzi [2]. W kontekście wizualizacji architektonicznych okulografia dostarcza informacji, które ich elementy najbardziej się wyróżniają, a poszczególne grafiki wywołują emocje. W ramach działalności koła naukowego CAVE funkcjonującego na Wydziale Architektury Politechniki Białostockiej przeprowadziliśmy własne badanie z wykorzystaniem technologii okulograficznej, w których za bazę bodźcową posłużyły wizualizacje koncepcji projektów architektonicznych.

2. Cel i zakres badania

Celem badania była analiza reakcji emocjonalnych wywołanych przez zaprezentowane wizualizacje projektów architektonicznych. Dodatkowo obserwowano, na jakie aspekty odbiorcy zwracają uwagę w pierwszej kolejności oraz ile czasu zajmuje im interpretacja przedstawionego obrazu.

Uczestnicy mieli określić swoje emocje wywołane przez daną grafikę. Zaznaczali „-”, jeśli były one negatywne, lub „+”, jeśli pozytywne. Każdy z nich otrzymał zestaw tych samych 27 wizualizacji (które zostały wykonane przez studentów architektury z różnym doświadczeniem zawodowym) wyświetlanych w losowej kolejności, aby uniknąć wpływu tzw. *order effect*. Założono, że osoby biorące udział w badaniu będą głównie poszukiwać elementów takich jak postaci ludzkie wywołujące kontrast w przedstawionej scenie, zamiast koncentrować się na budynku. Dodatkowo stwierdzono, że emocje będą przeważnie pozytywne ze względu na ryzyko wyrażenia negatywnej opinii o pracy rówieśników jako potencjalnego efektu wzajemności obserwacyjnej. Wyniki tego badania z jednej strony miały się przyczynić do polepszenia jakości projektów architektonicznych, by ich twórcy projektowali bardziej sprzyjające człowiekowi otoczenie, z drugiej zaś strony do budowy fundamentu naukowego do dalszych działań badawczych związanych z okulografią oraz percepcją wizualną projektów architektonicznych.



FOT. 1. Kadr z widoku uczestnika badania na wizualizację oraz elementy interaktywne

ŹRÓDŁO: oprac. własne.

3. Metodologia badawcza

W badaniu wykorzystano zaawansowany system śledzenia ruchu gałek ocznych Tobii Pro Fusion. Urządzenie to za pomocą fal podczerwonych analizuje odbicie światła od rogówki oraz ruch źrenicy. Na tej podstawie tworzone są punkty skupienia wzroku

(ang. *fixations*) oraz ścieżka jego ruchu (ang. *saccades*). Dane te umożliwiają precyzyjne ustalenie, w jakim kierunku patrzy uczestnik, jak długo skupia swój wzrok w danym miejscu są też pomocne przy kwantyfikacji w późniejszej analizie [3].



FOT. 2. Tobii Pro Fusion

ŹRÓDŁO: <https://www.tobii.com/products/eye-trackers/screen-based/tobii-pro-fusion> [dostęp: 28.05.2025].

Badanie zostało przeprowadzone na grupie 30 uczestników. Jest to zgodne z zaleceniami literatury dotyczącej okulografii [1, 4, 5], gdyż zapewnia wystarczające dane niezbędne do prawidłowego uzyskania wyników końcowych. W badaniu udział wzięli studenci architektury na różnych etapach studiów. Wśród jego uczestników byli zarówno polscy studenci, jak i osoby z programu ERASMUS+, dlatego instrukcje zostały przygotowane po polsku i po angielsku. Zróżnicowana grupa badawcza umożliwiła poznanie różnych perspektyw oraz doświadczeń w odbiorze i tworzeniu wizualizacji architektonicznych.

Stanowisko do przeprowadzenia eksperymentu zostało przygotowane w taki sposób, aby otoczenie nie rozpraszało uczestników badania i aby mieli możliwie największy komfort. Zadbano o odpowiednie doświetlenie pomieszczenia dla dobrego odczytu danych. Użyto fotela z możliwością regulacji wysokości siedziska oraz biurka z regulowaną wysokością, jako dodatkowych elementów pozwalających na kalibrację i dostosowanie do potrzeb danego uczestnika. Przed przystąpieniem do testu każdy został indywidualnie zaznajomiony z formą badania, wyraził też zgodę na przetwarzanie danych osobowych zgodnie z zaleceniami inspektora ochrony danych Politechniki Białostockiej.

Pierwszym etapem była kalibracja dziewięciopunktowa oraz jej walidacja, aby dostosować stanowisko wraz z urządzeniem pod indywidualne potrzeby i cechy uczestników badania. Następnie zaprezentowano im instrukcje ponawiające zakres nadchodzącego badania, element interaktywny informujący o rozpoczęciu badania oraz cztery próbne wizualizacje przed ukazaniem właściwych obrazów uwzględnionych w badaniu. Dodatkowe informacje wyświetlane na ekranie po kalibracji, a także wizualizacje miały zminimalizować szanse poboru danych o wątpliwej jakości ze względu na nienaturalne zachowanie się uczestnika w obcej mu przestrzeni laboratoryjnej. Dane okulograficzne ze wspomnianych wizualizacji wstępnych nie były brane pod uwagę, a jedynie stanowiły bufor emocjonalny. Wizualizacje były przedstawiane

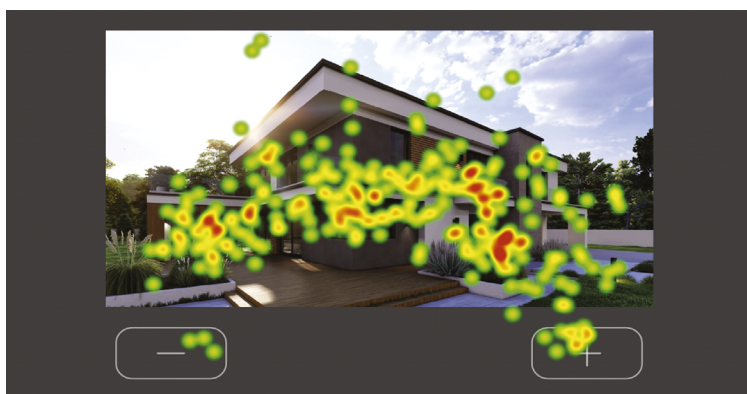
każdemu uczestnikowi w kolejności losowej. Swe odpowiedzi zaznaczali poprzez najeżdżanie kursorem myszki na odpowiednie pole oraz kliknięcie jej lewym przyciskiem na przycisk ekranowy „+” lub „-”, co powodowało przejście do kolejnej wizualizacji. W międzyczasie na środku ekranu pojawiał się punkt fiksacji na monochromatycznym tle jako element resetujący i skupiający chwilowo uwagę przed pojawieniem się następnej wizualizacji. Czas na udzielanie odpowiedzi oraz na całą sesję badawczą był nieograniczony, co umożliwiło badanym swobodną analizę obrazów, jak też dało możliwość podjęcia autonomicznej decyzji o przejściu do kolejnej wizualizacji. Po ukończeniu testu uczestnicy zostali poproszeni o wypełnienie ankiety z opinią na temat przebiegu badań, dzięki czemu w przyszłych eksperymentach będzie można uwzględnić ich uwagi.

4. Wyniki

Każde badanie z cyklu 30 uczestników zostało nagrane w oprogramowaniu Tobii Pro Lab, w którym zbierane były dane czasowe – zarówno całego przebiegu badania, jak i czasu analizy każdej z poszczególnych wizualizacji. Wyniki i wygenerowane dane przeanalizowano w tym samym programie. Najłatwiejsze w zrozumieniu wykresy analityczne oraz wizualizacje danych odnosiły się do map cieplnych (ang. *heatmaps*) oraz ścieżek wzroku (ang. *scanpaths*), co zgadzało się z literaturą dotyczącą przeprowadzania badań okولوجicznych [6]. Mapy cieplne obrazują intensywność skupienia uczestnika na danym bodźcu wizualnym – tam, gdzie padał wzrok badanego, pojawiły się plamy koloru. Przy wysokiej intensywności są to barwy ciepłe, np. kolor czerwony, podczas gdy miejsca przykuwające mniej uwagi oznaczane są barwami zimnymi, jak np. kolor zielony. Ścieżki wzroku natomiast ukazują drogę, którą pokonuje wzrok użytkownika podczas badania, oraz określają kolejność, w jakiej skupiał on uwagę na poszczególnych elementach obrazu.

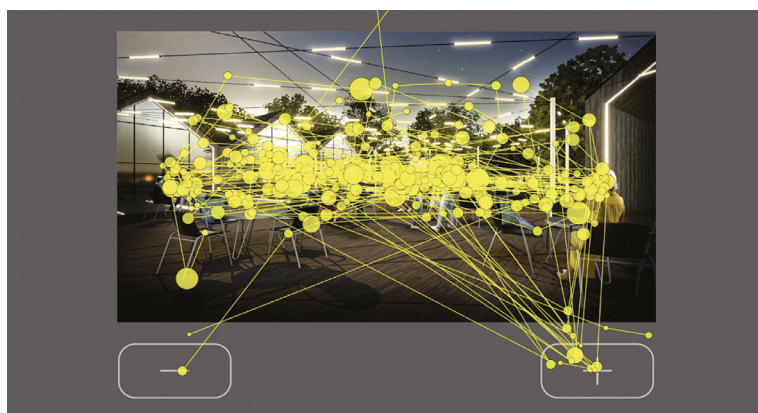
W przyjętej metodologii prezentacji wyników skupiono się na łatwości zrozumienia skomplikowanych działań operacyjnych związanych z okulografią. Chodzi o wizualizowanie danych w przystępny i intuicyjny sposób, co jest możliwe dzięki mapom cieplnym oraz ścieżkom wzroku. Ich właściwe opracowanie pozwoliło pokazać charakterystyczne cechy fiksacji wzroku uczestników badania, tak aby ujawnić miejsca, na których skupiali oni swój wzrok najbardziej i najmniej. Intensywne nasycenie czerwoną barwą sugerowało zarówno dłuższe skupienie wzroku, jak i liczniejsze krótsze fiksacje, co generowało podobne rezultaty w wizualizacji mapy ciepła. W przypadku ścieżek wzroku istotnymi informacjami były aglomeracje punktów fiksacji, ich rozmiar (czyli czas) oraz sieć połączeń punktów, która tworzyła liniowe mapy wzorów ruchu oczu. Wizualizacje częściowo miały bardziej smukły i horyzontalny układ sakkad, jednak w niektórych przypadkach odnotowano charakterystyczne skomplikowane i zróżnicowane siatki połączeń, sugerujące konieczność głębszego zastanowienia się nad istotą treści samego projektu architektonicznego. Strategiczne

umieszczenie przycisków interakcji pozwoliło odnotować proporcje reakcji pozytywnych do negatywnych odnośnie do samego obrazka na podstawie liczby ruchów sakkadowych. W wyniku analizy danych metrycznych udało się opracować dane dotyczące maksymalnego i minimalnego czasu oglądania obrazków wraz z wyliczoną średnią czasu obserwacji każdej z wizualizacji. Dane te były wyjątkowo rozbieżne – część uczestników nad każdą z wizualizacji spędzała mniej niż 1,5 sekundy i niemal natychmiast przechodziła dalej, inni zaś skrupulatnie rejestrowali każdy detal przedstawionej sceny. Dzięki tym wariacjom zebrano dane dotyczące krótkiego, średniego oraz długiego czasu obserwacji.



FOT. 3. Przykładowa mapa cieplna wykorzystana w badaniach na wizualizacji

ŹRÓDŁO: oprac. własne.



FOT. 4. Przykładowa ścieżka wzroku, na której widać przewagę pozytywnych emocji ze względu na charakter połączeń

ŹRÓDŁO: oprac. własne.



FOT. 5. Plansza 17

ŹRÓDŁO: oprac. własne.



FOT. 6. Plansza 18

ŹRÓDŁO: oprac. własne.

TABELA 1. Średni, minimalny i maksymalny czas spędzony przez uczestnika badania na analizie wizualizacji [w sekundach]

Kod planszy	Średni czas	Minimalny czas	Maksymalny czas
Plansza 1	3,24	0,97	10,65
Plansza 2	3,80	1,07	16,23
Plansza 3	3,29	1,12	9,87
Plansza 4	4,08	1,20	21,23
Plansza 5	3,70	0,92	14,48
Plansza 6	3,74	0,75	15,50
Plansza 7	3,83	0,80	17,95
Plansza 8	3,16	1,13	7,83
Plansza 9	4,30	0,90	27,67

Kod planszy	Średni czas	Minimalny czas	Maksymalny czas
Plansza 10	4,14	0,80	14,25
Plansza 11	3,72	0,65	13,60
Plansza 12	2,82	0,62	10,13
Plansza 13	4,10	0,88	11,57
Plansza 14	3,57	1,35	14,93
Plansza 15	3,75	1,35	15,32
Plansza 16	4,05	1,08	10,70
Plansza 17	3,34	0,73	11,98
Plansza 18	3,71	1,03	13,27
Plansza 19	3,63	0,70	22,62
Plansza 20	3,92	0,85	16,10
Plansza 21	3,25	1,03	11,58
Plansza 22	3,77	0,87	12,60
Plansza 23	4,03	0,93	13,67
Plansza 24	3,15	0,87	14,73
Plansza 25	2,92	0,95	10,35
Plansza 26	3,97	1,13	21,82
Plansza 27	3,88	1,23	13,03

ŹRÓDŁO: oprac. własne.

Po przeanalizowaniu wszystkich danych stwierdzono, że uczestnicy skupiali swój wzrok głównie na postaciach ludzkich. Nawet jeżeli były to półprzezroczyste sylwetki, nazywane kolokwialnie „duchami” lub „wycinkami” (ang. *cutout*), ich kształt był wystarczająco podobny, aby został przez odbiorców określony równą uwagą co pełne postaci ludzkie. Rudolf Arnheim wspominał w swoich publikacjach o zjawisku minimalnego przedstawiania elementów wizualnych: „Kilka charakterystycznych cech wystarcza nie tylko do określenia, czym lub kim jest postrzegany przedmiot, wystarcza także, by przedmiot ten jawił się jako pełny, zintegrowany wzór” [7]. Następnie uczestnicy skupiali się na zabudowie architektonicznej, rzadziej patrzyli na roślinność. W zależności od długości analizy zmieniały się miejsca oraz liczba punktów skupienia wzroku. Osoby, które poświęciły więcej czasu na analizę obrazu, skupiały się na takich detalach jak ptaki na niebie, jednak większość je ignorowała. Niebo było prawie przez wszystkich pomijane. Osoby, które szybko analizowały obrazy, skupiały się jedynie na budynku oraz na twarzach postaci ludzkich.

Emocje wywołane przez wizualizacje były w większej mierze pozytywne, tak jak zakładaliśmy w tezie. Niektóre obrazy wzbudzały niemal równą liczbę obu reakcji, lecz wciąż z lekką przewagą tych pozytywnych. Niezdecydowani badani twierdzili, że zaznaczali przycisk „+” mimo braku dominujących emocji. Największą liczbę reakcji negatywnych (21 przy 6 pozytywnych) uzyskała wizualizacja na planszy 17,

natomiast największą liczbę pozytywnych (22 przy 2 negatywnych) ta na planszy 18. Wszystkie zmienne zostały posortowane w indywidualnych raportach utworzonych po zakończeniu badania, według danych dotyczących każdej z wizualizacji.

5. Podsumowanie

Podsumowując, wyniki wskazują, że na wizualizacjach architektonicznych, na których znajdują się ludzie, wzrok odbiorców skupia się głównie na postaciach zamiast na budynku. Dodatkowo odnotowano zależność jakości wizualizacji do raportowanych emocji, potencjalny wpływ zieleni na pozytywny odbiór obrazu oraz istotę ładu przestrzennego w projekcie przy generowaniu pozytywnych emocji wśród odbiorców wizualizacji architektonicznej. Można również zaobserwować, że wzrok odbiorców porusza się głównie horyzontalnie, co podtrzymuje klasyczne założenie ruchu oczu, które spotykane jest w eye-trackingu przy obserwacji tekstów [3]. Dzięki temu zyskujemy informację na temat ludzkiej percepcji przestrzennej oraz tego, czym różni się obserwacja scen trójwymiarowych od dwuwymiarowych tekstów. Z perspektywy praktycznej wnioski mogą się przyczynić do rozwoju i poprawy zrozumienia jakości komercyjnej w dziedzinie architektury. Dzięki tym odkryciom zarówno studenci, jak i architekci z doświadczeniem zawodowym mogą tworzyć i korygować wizualizacje swoich projektów w taki sposób, aby lepiej trafiały do potencjalnych klientów i przejrzyscie przekazywały kluczowe cechy projektowe. Uwzględnienie wyników badań w tworzeniu wizualizacji architektonicznych pozwoli na sprawniejszą komunikację z klientem, a także ogólną poprawę efektywności projektowania architektonicznego.

Jako SKN CAVE chcemy wykorzystać nasze wyniki oraz doświadczenie nabyte podczas przeprowadzania tego badania, aby kontynuować naukowy rozwój w dziedzinie okulografii w architekturze. Jest to domena nadal nie w pełni zbadana. Mamy nadzieję, że nasze odkrycia pomogą zrewolucjonizować podejście do architektury jako dziedziny sztuki, nauki i zawodu.

Literatura

- [1] Carter B.T., Luke S.G., *Best practices in eye tracking research*, „International Journal of Psychophysiology” 2020, vol. 155, s. 49–62.
- [2] Krejtz K., Rutkowska-Siuda D., Krejtz I., *Gaze-Led Audio Description (GLAD). Concept and Application to Accessibility of Architectural Heritage*, [w:] *Transforming Media Accessibility in Europe*, red. A. Marcus-Quinn, K. Krejtz, C. Duarte, Springer Nature, Cham 2024, s. 53–72.
- [3] Tobii, <https://www.tobii.com/products/eye-trackers/screen-based/tobii-pro-fusion> [dostęp: 23.11.2024].
- [4] Bojko A., *Eye Tracking the User Experience: A Practical Guide to Research*, Rosenfeld Media, New York 2013.

- [5] Pernice K., Nielsen J., *How to Conduct Eyetracking Studies*, <https://www.useit.com/eyetracking/methodology/> [dostęp: 23.11.2024].
- [6] Hoffman J.E., Subramaniam B., *The role of visual attention in saccadic eye movements* „Perception & Psychophysics” 1995, vol. 57(6), s. 787–795.
- [7] Arnheim R., *Sztuka i percepcja wzrokowa. Psychologia twórczego oka*, tłum. J. Mach, Wydawnictwo Artystyczne i Filmowe, Warszawa 1978.

Key words: eye tracking, architectural visualization, gaze patterns, visual perception

Wpływ technologii na bezpieczeństwo informacyjne w Polsce

Julia Gawron, Katarzyna Laska, Zuzanna Ścibura
Koło Polityki Bezpieczeństwa Państwa, Politechnika Rzeszowska

1. Wstęp

We współczesnym społeczeństwie, określanym mianem społeczeństwa informacyjnego, kluczową rolę w funkcjonowaniu jednostek, instytucji oraz całych państw odgrywają informacje i technologie. Warto jednak zacząć od tego, czym właściwie jest informacja. To dobro (intelektualne) o charakterze niematerialnym [1]. Bycie w posiadaniu informacji stało się warunkiem lepszego oraz bezpieczniejszego życia, a sama informacja zaczęła być chroniona jako dobro materialne [2]. W czasach dynamicznego rozwoju technologicznego bezpieczeństwo informacyjne staje się jednym z najważniejszych wyzwań. W związku z tym konieczne jest zrozumienie, czym ono jest, aby móc lepiej ocenić jego rolę i znaczenie w kontekście współczesnych zagrożeń cyfrowych.

2. Historia powstania bezpieczeństwa informacyjnego

Już w starożytności pojawiły się pierwsze formy kryptografii. W Rzymie do ochrony wiadomości używano prostych szyfrów, takich jak szyfr Cezara [3]. Była to zatem wczesna forma ochrony danych, co pokazuje, jak ważne było zabezpieczanie informacji przed nieuprawnionym dostępem. Tak więc pojęcie bezpieczeństwa informacyjnego nie jest zagadnieniem nowym, jego ślady pojawiły się w VI wieku p.n.e. za sprawą chińskiego filozofa Sun Tzu, który opracował pierwsze strategie walki informacyjnej [2]. W swojej książce *Sztuka wojny* zwracał uwagę, jak istotne jest posiadanie wiedzy o przeciwniku.

W średniowieczu rozwój administracji wymagał wprowadzenia dekretów¹ czy testamentów, które były chronione przez pieczęcie, co świadczyło o autentyczności dokumentu [4]. Stanowiły one formę zabezpieczenia informacji. Także Kościół

¹ Dekret – w dawnej Polsce wyrok sądu lub akt normatywny wydany przez króla.

katolicki odegrał kluczową rolę w kształtowaniu bezpieczeństwa informacyjnego. W klasztorach gromadzono i kopiowano cenne teksty, co bezpośrednio przyczyniało się do ochrony wiedzy oraz informacji. W tym okresie informacje były często wykorzystywane jako broń w konfliktach. Dlatego ich ochrona stała się nie tylko kwestią administracyjną, lecz także militarną.

Bezpieczeństwo informacyjne w XV wieku w Polsce znacząco ewaluowało. W ówczesnych konfliktach skuteczna ochrona tajnych dokumentów była niezbędna. Ich utrata mogła mieć poważne konsekwencje dla wyniku bitew oraz stabilności politycznej w regionie. Praktyki stosowane w średniowieczu stanowiły podstawy, na których później rozwijały się bardziej zaawansowane systemy bezpieczeństwa informacyjnego. Wiarygodna, rzetelna, dokładna i aktualna informacja zawsze bowiem była istotna przy podejmowaniu decyzji państwowych, w szczególności w dziedzinie bezpieczeństwa – zarówno zewnętrznego, jak i wewnętrznego [5].

W XX wieku pojęcie bezpieczeństwa informacyjnego nabrało zupełnie nowego znaczenia. Natomiast termin „bezpieczeństwo informacyjne państwa” (podmiot) został wprowadzony dopiero w drugiej połowie tego stulecia. Rozwój technologii, powstanie nowych systemów komunikacyjnych oraz zmiany geopolityczne spowodowały, że ochrona informacji stała się jednym z priorytetów nie tylko w sferze militarnej, lecz także cywilnej. W pierwszej połowie wieku bezpieczeństwo informacyjne było ściśle związane z ochroną tajemnic państwowych oraz technikami szyfrowania. W czasie I wojny światowej komunikacja wojskowa bazowała na technikach kryptograficznych. Jednym z najsłynniejszych przykładów jest złamanie przez polskich kryptologów: Mariana Rejewskiego, Jerzego Różyckiego i Henryka Zygalskiego szyfru nadawanego przez Niemców z wykorzystaniem Enigmy [6]. Rozwój technologii komunikacyjnych przyczynił się do powstania nowych metod szyfrowania. Polska musiała zmierzyć się z zachodnimi technikami wywiadowczymi, co prowadziło do ciągłego rozwoju systemów kryptograficznych i zabezpieczeń informacyjnych.

Rok 1991, który wyznacza rozpoczęcie w Polsce ery internetu, był momentem przełomowym w sferze ochrony informacji [7]. Powstanie cyberprzestrzeni stworzyło nowe wyzwania dla bezpieczeństwa informacyjnego państwa. Polska, podobnie jak inne kraje, musiała dostosować swoje systemy ochrony informacji do nowej rzeczywistości cyfrowej. W tym czasie zaczęto tworzyć nowoczesne systemy bezpieczeństwa, takie jak firewalle czy programy antywirusowe, oraz systemy monitorowania sieci, które stały się standardem ochrony informacji w coraz bardziej cyfrowym świecie [8].

Wraz z nadejściem XXI wieku, gwałtownym rozwojem technologii cyfrowych i masowym przetwarzaniem danych zwiększyła się liczba zagrożeń związanych z cyberprzestrzenią. Cyberzagrożenia, które mają bezpośredni wpływ na bezpieczeństwo informacyjne, stały się jednym z priorytetowych wyzwań dla państwa. Polska jako część globalnej infrastruktury cyfrowej musiała wprowadzić nowe regulacje i mechanizmy obrony przed cyberatakami. Powstały instytucje państwowe, takie jak Zespół Reagowania na Incydenty Bezpieczeństwa Komputerowego (CSIRT), które zajmują się monitorowaniem przestrzeni informacyjnej i aktywnym reagowaniem w przypadku

wystąpienia bezpośrednich zagrożeń dla użytkowników [9]. Niezwykle ważne stało się również bezpieczeństwo danych osobowych, co doprowadziło do wejścia w życie 10 maja 2018 roku rozporządzenia o ochronie danych osobowych (RODO) [10].

Historia bezpieczeństwa informacyjnego ukazuje ewolucję tego pojęcia od prostych technik zabezpieczania danych w starożytności po zaawansowane systemy cyfrowe.

3. Uwarunkowania bezpieczeństwa informacyjnego i jego wpływ na poszczególne dziedziny życia

3.1. Gospodarka

Współczesne rynki są mocno uzależnione od przechowywania i wymiany danych zarówno w kontekście transakcji finansowych, jak i relacji między firmami a ich klientami. Zabezpieczanie tych danych buduje zaufanie konsumentów i partnerów biznesowych. Skutkiem ich utracenia jest zniszczenie reputacji firm. Przez tego typu zagrożenia nastąpił wzrost na rynku ubezpieczeń. Firmy coraz częściej sięgają po polisy przeciw cyberatakowi, aby uniknąć ich wystąpienia [11]. Dzięki komputerom i internetowi ludzie zyskali możliwość pracy w międzynarodowych firmach bez konieczności wyjeżdżania za granicę. Coraz bardziej popularna staje się też praca zdalna, czyli tak zwany *home office*, która umożliwia wykonywanie obowiązków służbowych z domu, bez potrzeby przebywania w firmie. Ludzie mają również możliwość załatwiania różnych spraw przez internet, od robienia zakupów aż po podpisywanie dokumentów online przy użyciu elektronicznego podpisu.

Bezpieczeństwo informacyjne wpływa w szczególności na kształtowanie sposobów, jak chronić własną tożsamość, przekazywać wiedzę czy dzielić się twórczością. Technologie cyfrowe umożliwiają też łatwe udostępnianie twórczości, z czym wiążą się takie zagrożenia jak kradzież praw autorskich czy piractwo. W społeczeństwach multikulturowych internet może być przestrzenią występowania cyberprzemocy, hejtu czy dyskryminacji.

3.2. Polityka

Cały czas zacierają się granice między rynkiem krajowym a zagranicznym [12]. Dzięki rozwojowi technologicznemu państw możliwe jest nawiązywanie międzynarodowej współpracy czy sojuszy, polepszanie strategii obronnych. Przykładowo Unia Europejska współpracuje z Europejską Agencją Obrony (EDA), która wspiera państwa członkowskie w kształceniu wykwalifikowanych wojskowych zajmujących się cyberobroną [13].

Rozwój środków masowego przekazu sprawia, że politycy muszą uważać na to, co mówią i co umieszczają w internecie, by nie stracić zaufania publicznego. W sytuacji, gdy obywatele mają wątpliwości co do integralności i wiarygodności danych, mogą zacząć kwestionować decyzje polityczne, to zaś może prowadzić do destabilizacji rządu.

Do ochrony dużych baz danych stosuje się politykę programową. Służy ona do tworzenia programu bezpieczeństwa informacji w organizacjach, wyznacza kierunek zabezpieczeń oraz przydziela zasoby, które można wdrożyć w życie [14]. Państwowym instytutem badawczym w Polsce jest NASK, który zajmuje się poszukiwaniem i wdrażaniem rozwiązań służących do rozwoju sieci teleinformatycznych. Instytut prowadzi badania i działalność na rzecz polskiej cywilnej cyberprzestrzeni oraz edukuje i promuje koncepcje społeczeństwa informacyjnego, głównie aby chronić dzieci i młodzież przed zagrożeniami w sieci [15].

3.3. Społeczeństwo

Świat wirtualny przenika do realnego, a komputeryzacja i robotyzacja stały się codziennością. Przez rozwój internetu i komputerów powstało nowe pojęcie, takie jak społeczeństwo informacyjne, które w różnych sektorach aktywności społecznej wykorzystuje rozwiniętą bazę informacyjną i komunikacyjną. Polega ono również na tym, że ludzie mogą uczestniczyć w produkcji, gromadzeniu i obiegu informacji. Przez rozwój nowych technologii społeczeństwo stało się uzależnione od cyfryzacji.

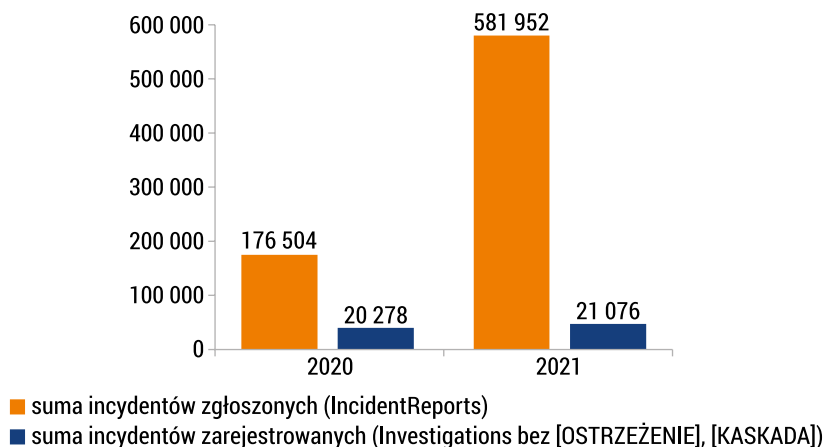
4. Analiza danych statystycznych w latach 2019–2024

Zespół Reagowania na Incydenty Bezpieczeństwa Komputerowego CSIRT GOV prowadzony przez szefa Agencji Bezpieczeństwa Wewnętrznego w okresie od 1 stycznia do 31 października 2021 roku zanotował 581 952 zgłoszone incydenty, co przełożyło się na 21 076 faktycznych incydentów w systemach teleinformatycznych instytucji administracji rządowej oraz infrastruktury krytycznej.

W stosunku do roku 2020 był to znaczący, ponadtrzykrotny wzrost liczby incydentów zgłoszonych (w 2020 roku – 176 504) przy jednoczesnym utrzymaniu się liczby faktycznych incydentów na porównywalnym poziomie. Różnica w ilości zarejestrowanych incydentów wynikała przede wszystkim z rosnących możliwości wykrycia systemu wczesnego ostrzegania o zagrożeniach w sieci internet ARAKIS GOV, co przełożyło się na rejestrowanie większej liczby zdarzeń.

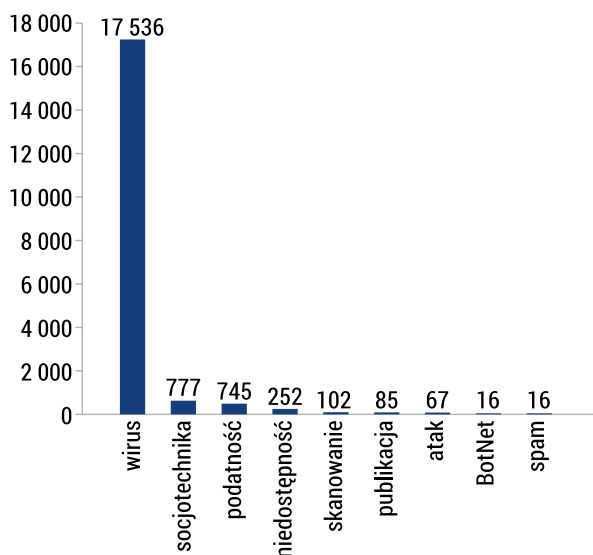
Najliczniejszą grupę zgłaszanych incydentów stanowiły wirusy – ponad 17,5 tys. zgłoszeń. Mogło to świadczyć o uszkodzeniu systemu antywirusowego w instytucji administracji państwowej lub u operatora infrastruktury krytycznej. Do drugiej kategorii najczęściej identyfikowanych incydentów zaliczamy zagrożenia związane z zastosowaniem socjotechniki, m.in. ataki i kampanie phishingowe, których w sumie

zanotowano 777. Trzecią grupą pod względem liczności incydentów jest „podatność” (745 zgłoszonych incydentów), rozumiana jako słabość systemu teleinformatycznego, błędy konfiguracyjne oraz brak odpowiedniej polityki bezpieczeństwa związanej z aktualizacją i weryfikacją poprawnie wdrożonych rozwiązań teleinformatycznych.



WYKRES 1. Zgłoszone incydenty

ŹRÓDŁO: [16].

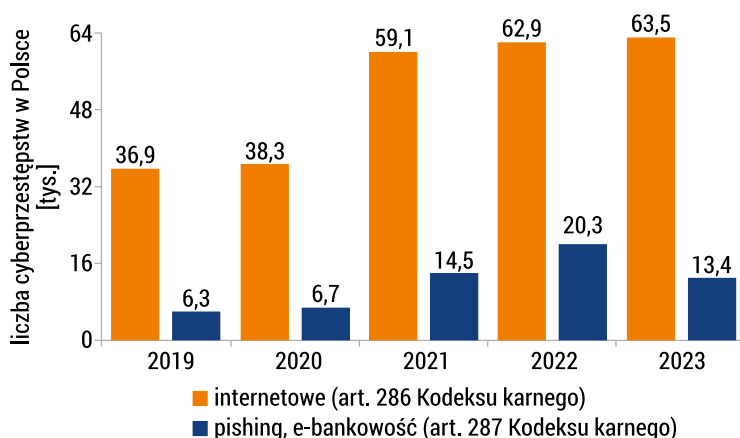


WYKRES 2. Kategorie incydentów

ŹRÓDŁO: [16].

Specjaliści zwracają uwagę, że z roku na rok notujemy coraz większą liczbę cyberprzestępstw w Polsce. Według policyjnych danych dotyczących zdarzeń popełnianych z art. 267 (bezprawne uzyskanie informacji), 286 (oszustwo) i 287 (oszustwo komputerowe) Kodeksu karnego w 2023 roku w Polsce stwierdzono prawie 83 tys. cyberprzestępstw. W ciągu pięciu lat ich liczba wzrosła o 72%, gdyż w 2019 roku było ich „zaledwie” 48,1 tys., dwa lata później już niemal 79 tys., a najwięcej (88,5 tys.) w 2022 roku. W 2023 roku liczba cyberprzestępstw spadła o ponad 6% w stosunku do roku 2022. Za ten spadek odpowiada wyraźnie mniejsza liczba zdarzeń z art. 287 (*phishing*, e-bankowość). W 2022 roku było ich ponad 20 tys., a w 2023 – 13,4 tys.

Dane ukazane na wykresie 3 dotyczą cyberprzestępstw w zakresie art. 286 i art. 287 k.k.



WYKRES 3. Liczba cyberprzestępstw w Polsce w latach 2019–2023

ŹRÓDŁO: [17].

Jednym z najpoważniejszych zagrożeń we współczesnym cyfrowym świecie jest wyciek danych. Utrata poufnych informacji może mieć katastrofalne skutki zarówno dla osób prywatnych, jak i całych organizacji. Taki wyciek oznacza, że dane użytkowników z różnych serwisów internetowych zostały upublicznione.

Ile procent Polaków spotkało się w ostatnim roku z próbą wyłudzenia ich danych? Wycieku danych obawia się 40% dorosłych Polaków. W badaniu „Wiedza na temat bezpieczeństwa ochrony danych osobowych w Polsce” [18] niemal 33% respondentów zadeklarowało, że w ciągu ostatnich 12 miesięcy spotkało się z próbą wyłudzenia ich danych przez fałszywy telefon, SMS lub e-mail, a 25% oznajmiło, że takiej sytuacji doświadczył ich znajomy bądź członek rodziny. Jednocześnie 12,4% badanych przyznało, że takimi sposobami oszustom udało się wyłudzić ich dane. Ponad 13% Polaków mierzyło się z wyciekiem danych z prywatnych firm (7,5%) i instytucji publicznych (5,6%). Podobnie wskazywali w odniesieniu do swoich rodzin i znajomych. A 22% ankietowanych tak naprawdę nie ma pewności, czy ich dane nie trafiły tą drogą w ręce przestępców.

Jak wynika z cytowanych w badaniu statystyk Urzędu Ochrony Danych Osobowych, liczba zgłaszanych naruszeń ochrony danych osobowych w ostatnich latach rośnie. W 2022 roku do UODO zgłoszono niemal 13 tys. takich przypadków, a dwa lata wcześniej – 7,5 tys. Zdaniem ekspertów serwisu ChronPESEL.pl rzeczywista skala zagrożenia bezpieczeństwa danych osobowych jest jednak znacznie wyższa. Użytkownicy internetu nie przestrzegają podstawowych zasad pracy w sieci, np. nie sprawdzają autentyczności e-maili i linków, w które klikają. Choć, jak oceniają eksperci, ogromna większość (86%) deklaruje, że potrafi rozpoznać fałszywą wiadomość bądź telefon, w którym ktoś powołuje się na znaną instytucję lub firmę, to jednak absolutnie pewnych tego faktu jest zaledwie 18,5% ankietowanych [19].

Raport IBM pokazuje, że organizacje wdrażające nową technologię charakteryzują się krótszym czasem reakcji i niższymi kosztami naruszenia bezpieczeństwa danych. Obrona cyberbezpieczeństwa oparta na sztucznej inteligencji skraca czas wykrycia i ograniczenia naruszeń do 249 dni [20]. W organizacjach wykorzystujących AI oraz automatyzację czas trwania naruszenia danych był o 108 dni krótszy w porównaniu z organizacjami, które nie wdrożyły wspomnianych technologii [21].

5. Wnioski końcowe

Wpływ technologii na bezpieczeństwo informacyjne w Polsce jest wielowymiarowy i dynamiczny. Z jednej strony internet oferuje nieograniczone możliwości rozwoju. Z drugiej strony rozwijające się środowisko cyberprzestrzeni jest idealnym miejscem dla przestępców internetowych, którzy wraz z postępem technologicznym są coraz bardziej efektywni i mają dostęp do coraz pilniej strzeżonych danych. Odpowiednio wczesna reakcja na liczbę wyzwań w cyberprzestrzeni może umocnić nie tylko bezpieczeństwo informacyjne, lecz także bezpieczeństwo narodowe. Współczesne problemy wymagają nowoczesnych rozwiązań – można wykorzystać AI do wykrywania i powstrzymywania ataków phishingowych, gdy tylko zainfekowane e-maile dotrą do skrzynek odbiorczych pracowników. Zaawansowane funkcje sztucznej inteligencji, takie jak analiza wiadomości, mogą identyfikować szkodliwe treści na podstawie wielu punktów porównania w celu zwiększenia skuteczności. Włączenie pracowników w środki cyberbezpieczeństwa daje większą szansę na odparcie cyberzagrożeń i możliwości obronne, może też zapobiec kosztownym naruszeniom bezpieczeństwa danych.

Literatura

- [1] Alkowski P., *Bezpieczeństwo informacyjne – zarys wybranych aspektów w kontekście problemu bezpieczeństwa państwa*, Temida 2, Białystok 2015.
- [2] Grzebiela K., *Pojęcie i istota bezpieczeństwa informacyjnego*, „Kultura Bezpieczeństwa. Nauka, Praktyka, Refleksje” 2018, nr 30, s. 87–101.
- [3] Karbowski M., *Podstawy kryptografii*, wyd. 2, Helion, Gliwice 2008.
- [4] Bobowski B., *Testament w średniowiecznym prawie polskim*, „Prace Naukowe Akademii im. Jana Długosza w Częstochowie. Zeszyty Historyczne” 2009, t. 10, nr 10, s. 83–90.
- [5] Aleksandrowicz T.R., *Bezpieczeństwo informacyjne państwa*, „Studia Politologiczne” 2018, t. 49, s. 33–50.
- [6] Grajek M., *Enigma i tajemnica złamania szyfru*, Ciekawostki Historyczne, 2022, <https://ciekawostkihistoryczne.pl/2022/12/25/enigma-i-tajemnica-zlamania-szyfru/> [dostęp: 25.12.2022].
- [7] NASK, *Internet w Polsce ma 30 lat*, <https://archiwum.nask.pl/pl/aktualnosci/4271,Internet-w-Polsce-ma-30-lat.html> [dostęp: 30.05.2025].
- [8] Niechciał R., *Co to firewall? Rodzaje i działanie*, Vestigio, 2024, <https://vestigio.agency/pl/blog/co-to-firewall/> [dostęp: 29.09.2024].
- [9] Dmitruk P., Karpowicz J., *Zespół Reagowania na Incydenty Bezpieczeństwa Komputerowego (CSIRT)*, Ministerstwo Cyfryzacji, 2019, <https://www.gov.pl/web/cyfryzacja/zespol-reagowania-na-incydenty-bezpieczenstwa-komputerowego-csirt> [dostęp: 4.10.2024].
- [10] Ustawa z dnia 10 maja 2018 r. o ochronie danych osobowych (Dz.U. 2018, poz. 1000).
- [11] Mika E., *Cyberochrona – ubezpieczenie na wypadek utraty danych i naruszenia bezpieczeństwa informacyjnego*, Temidium.pl, 2018, https://www.temidium.pl/arttykul/cyberochrona_ubezpieczenie_na_wypadek_utraty_danych_i_naruszenia_bezpieczenstwa_informatycznego-4810.html?fbclid=IwY2xjawF7qZNLeHRuA2FlbQIxMAABHYGerTCVMn0YyLIfx36dULjHHk5-N21wkaUTQN2mgzd5t_yeGOMPhXMdwg_aem-XxsdpDaOvOzGzXiHg263YA [dostęp: 30.09.2024].
- [12] Mączyński J., *Transfer technologii a gospodarka*, [w:] *Raport o innowacyjności gospodarki Polski w 2005 roku*, red. T. Baczko, PAN, Warszawa 2005, s. 127–129.
- [13] Rada Europejska, *Misje i operacje cywilne i wojskowe*, https://www.consilium.europa.eu/pl/policies/defence-security/?fbclid=IwY2xjawF7q2FleHRuA2FlbQIxMAABHf-0wSxGA92f2fQsBe5f5-dm4XS8gPBzyJ3ZXzGWwelD2Jah2Gzr-UqR8Q_aem_AQ6qhcWTn_Q9dRIHny0Nfg#cyber [dostęp: 30.09.2024].
- [14] Ministerstwo Cyfryzacji, *Bezpieczeństwo informacji – wprowadzenie NSC 800-12*, 2023, s. 53, <https://www.gov.pl/web/baza-wiedzy/narodowe-standardy-cyber> [dostęp: 30.09.2024].
- [15] <https://www.nask.pl/> [dostęp: 30.09.2024].
- [16] Rzecznik Prasowy Ministra Koordynatora Służb Specjalnych, *Zagrożenia w cyberprzestrzeni*, <https://www.gov.pl/web/sluzby-specjalne/zagrozenia-w-cyberprzestrzeni> [dostęp: 30.09.2024].
- [17] Kucharczyk K., *Zaskakujące dane o atakach hakerskich w Polsce*, <https://www.rp.pl/biznes/art39842121-zaskakujace-dane-o-atakach-hakerskich-w-polsce> [dostęp: 15.02.2024].
- [18] ChronPESEL.pl, https://chronpesel.pl/?gad_source=1&gad_campaignid=19668837336&gbraid=0AAAAAo-mLaCWU-kczF-Ef0FCWzKkzCl1R&gclid=EAIAIQobChMI24PI18z-KjQMvxc9EBx0Q8DmmEAAYASAAEgLJYPD_BwE [dostęp: 30.05.2025].
- [19] Polska Agencja Prasowa, *Eksperci: 40 proc. dorosłych Polaków obawia się wycieku danych osobowych*, <https://www.pap.pl/aktualnosci/eksperci-40-proc-doroslych-polakow-obawia-sie-wycieku-danych-osobowych> [dostęp: 14.10.2024].

- [20] Amosa Z., *Jak sztuczna inteligencja zmniejsza koszty naruszenia danych*, <https://www.unite.ai/pl/how-ai-reduces-the-cost-of-a-data-breach/> [dostęp: 23.09.2024].
- [21] Marszycki M., *Raport IBM: Średni, globalny koszt naruszenia danych sięgnął 4,45 miliona dolarów*, ITwiz, 2023, <https://itwiz.pl/raport-ibm-sredni-globalny-koszt-naruszenia-danych-siegnal-445-miliona-dolarow/> [dostęp: 6.09.2024].

Key words: information security, cybersecurity, information security threats and challenges, new technologies

Świadomość wykorzystywania sztucznej inteligencji w procesie uczenia się studentów Politechniki Lubelskiej

Ewa Organista, Aleksandra Lisiecka, Konrad Kostecki, Barbara Buraczyńska

*Studenckie Koło Naukowe Technologii Informatycznych
i Multimedialnych „TeamWEB”, Politechnika Lubelska*

1. Wstęp

Sztuczna inteligencja (AI, ang. *Artificial Intelligence*) łącznie z internetem rzeczy, przetwarzaniem w chmurze, wirtualną i rozszerzoną rzeczywistością, uczeniem maszynowym i automatyzacją jest nieodłącznie związana z Przemysłem 4.0. Wspomniane technologie dążą do usprawnienia procesów związanych z tworzeniem produktów i usług [5]. Wykorzystanie AI wpłynęło na wiele dziedzin życia, w tym na edukację. Umożliwia lepsze dostosowanie metody nauczania do indywidualnych potrzeb i jednocześnie redukuje obciążenie pracami administracyjnymi [13]. Większe zainteresowanie zastosowaniem tej technologii było zauważalne po roku 2020 jako efekt pandemii COVID-19, gdy większość placówek oświaty prowadziła nauczanie zdalne. Pod wpływem ówczesnej sytuacji pojawiła się potrzeba usprawnienia lub rozwinięcia już istniejących bądź opracowania nowych narzędzi i metod nauczania czy uczenia się.

2. Pojęcie sztucznej inteligencji

Współcześnie inteligencję rozumie się jako zdolność do współdziałania ze zdolnością kreowania w sferze emocjonalnej, motywacyjnej czy też interpersonalnej ludzkiej psychiki [8]. Termin „sztuczna inteligencja” pierwszy raz został zdefiniowany przez Johna McCarthy’ego jako: „konstruowanie maszyn, o których działaniu dałoby się powiedzieć, że są podobne do ludzkich przejawów inteligencji” [12]. Od tego czasu powstało wiele innych definicji, np. że jest to „inteligencja cechująca maszyny, która określa zdolność maszyn do wykonywania złożonych funkcji wykonywanych do tej pory wyłącznie przez ludzi” [9].

Według programu Chat GPT sztuczna inteligencja jest dziedziną informatyki zajmującą się tworzeniem inteligentnych maszyn i systemów, które mogą wykonywać zadania wymagające ludzkiej inteligencji. Obejmuje to takie zdolności jak rozumowanie, uczenie się, rozpoznawanie wzorców, percepcja, podejmowanie decyzji i rozwiązywanie problemów. AI może być zintegrowana w różnych aplikacjach, poczynając od asystentów głosowych przez autonomiczne pojazdy po złożone systemy do analizy danych [3].

Sztuczna inteligencja ma również szerokie zastosowanie w edukacji. Nauczyciele wykorzystują ją do przygotowywania materiałów edukacyjnych, wspomaga proces samodzielnego uczenia się. Narzędzia korzystające ze sztucznej inteligencji stanowią istotną pomoc zarówno dla uczniów, jak i studentów, którzy coraz częściej sięgają po nie w trakcie nauki [4].

3. Zalety i zagrożenia wykorzystania AI w procesie uczenia się

Praktyka studencka wskazuje na wiele zalet użycia sztucznej inteligencji w procesie uczenia się. Są to: łatwiejszy i szybszy dostęp do złożonych informacji; mniejszy nakład pracy przy ich wyszukiwaniu i analizowaniu; przyjazna forma informacji – dopasowana do poziomu poznawczego ucznia. Ponadto korzystając z AI, studenci poznają nowe technologie i rozwijają umiejętności przyszłości. Narzędzia oparte na sztucznej inteligencji wspierają automatyzację rutynowych zadań i zdalne nauczanie.

Kolejnym przykładem zalet AI są oparte na niej adaptacyjne systemy uczenia się, które pozwalają dostosowywać treści edukacyjne do własnych tempa i stylu. Generowane przez te systemy i przekazywane w czasie rzeczywistym informacje zwrotne (np. pochwały, korekty błędów) pozytywnie wpływają na utrzymanie zainteresowania studentów. Dodatkowo zapobiegają one frustracji, która mogłaby się pojawić przy przerabianiu trudnego materiału bez żadnego wsparcia. Takie personalizowanie doświadczeń edukacyjnych osób uczących się poprawia ich zaangażowanie i zwiększa poziom satysfakcji z nauki [10]. Badania pokazują, że studenci, korzystając z narzędzi do nauki wspomaganych przez AI, uzyskują lepsze wyniki testów i odnoszą większe sukcesy, szczególnie w przedmiotach ścisłych [7, 10].

Wspomagane sztuczną inteligencją uczenie się ma jednak wady. Jednym z zagrożeń jest uzależnienie się od technologii, które w konsekwencji może prowadzić do zmniejszenia zdolności samodzielnego myślenia i rozwiązywania problemów czy do wielogodzinnego przesiadywania przed komputerem. Jednocześnie istnieje ryzyko, że uzyskane informacje są błędne lub nieprawdziwe (halucynacje AI), więc generowane dane wymagają sprawdzenia w wiarygodnych źródłach [6].

Wykorzystanie sztucznej inteligencji w procesie uczenia niesie też zagrożenia zdrowotne. Może negatywnie wpływać na zdrowie fizyczne, bo długie godziny spędzane przed ekranem monitora prowadzą do powstawania i pogłębiania się np. wad

wzroku czy wad postawy. Jednocześnie ograniczenie kontaktów międzyludzkich negatywnie wpływa na zdrowie psychiczne użytkowników AI. Sztuczna inteligencja nie może zastąpić społecznych i emocjonalnych aspektów uczenia się w grupie innych studentów-ludzi. Zagrożeniami są też naruszenia prywatności i bezpieczeństwa danych rozlegle gromadzonych przez AI oraz potencjalna stronniczość jej algorytmów [10].

4. Cel badań i hipotezy badawcze

Problemem badawczym podjętym w pracy jest świadomość wykorzystania sztucznej inteligencji w procesie uczenia się studentów Politechniki Lubelskiej. Badania mają wskazać narzędzia wspomagane sztuczną inteligencją, z których korzystają studenci, oraz sposoby ich używania w celach naukowych. Celem badań jest określenie świadomości studentów na temat zalet i zagrożeń wykorzystania AI podczas nauki. Na podstawie przeglądu literatury postawiono następujące hipotezy badawcze:

- H1: Narzędzia wspomagane sztuczną inteligencją są chętnie wykorzystywane przez studentów podczas nauki, a w szczególności do przygotowywania się do zajęć, zaliczeń i egzaminów.
- H2: Studenci są świadomi zalet wykorzystania sztucznej inteligencji w procesie uczenia się.
- H3: Istnieją zagrożenia związane z wykorzystaniem sztucznej inteligencji w procesie uczenia się, których studenci nie są świadomi.

5. Metoda badawcza i narzędzie badawcze

Do oceny świadomości wykorzystywania AI w procesie uczenia się użyto metody ilościowej, która pozwala opisywać i wyjaśniać zjawiska na podstawie pomiaru zmiennych i ich analizy [1, 2]. Narzędziem badawczym był kwestionariusz ankiety opracowany z uwzględnieniem obecnego stanu wiedzy oraz po konsultacji ze studentami różnych kierunków studiów i różnych wydziałów Politechniki Lubelskiej. Badania przeprowadzono przy pomocy kwestionariusza elektronicznego w usłudze Formularze Google. Studenci Politechniki Lubelskiej byli proszeni o jego wypełnienie oraz przekazanie go znajomym z grupy przez media społecznościowe (Facebook, MS Teams) czy wiadomości e-mail.

Kwestionariusz ankiety składał się z dwóch części. Pierwsza zawierała dziesięć pytań zamkniętych dotyczących używania narzędzi wspomaganych sztuczną inteligencją w procesie uczenia się. W drugiej części znajdowało się siedem pytań odnoszących się do informacji demograficzno-edukacyjnych o respondentach.

6. Obiekt badań

Kwestionariusz badawczy został wypełniony przez 131 studentów Politechniki Lubelskiej. Respondenci reprezentowali różne wydziały, kierunki studiów i ich stopnie (tabela 1). Wybrano szeroką grupę studentów będącą przekrojem społeczności studenckiej Politechniki Lubelskiej, reprezentatywną dla badanej populacji.

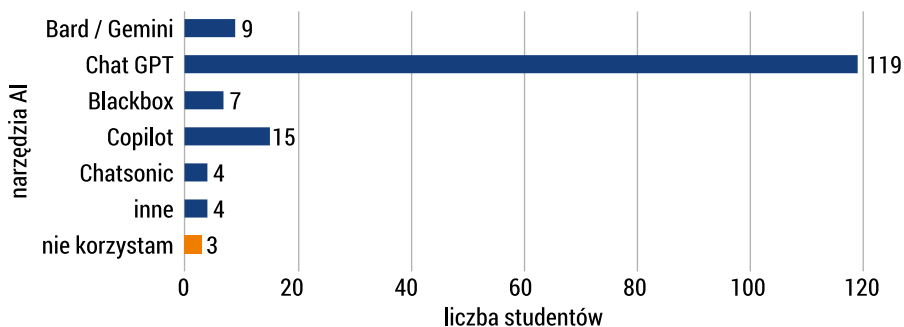
TABELA 1. Charakterystyka respondentów

Dane	Liczba	Procent
Płeć		
Kobieta	45	34,4
Mężczyzna	81	61,8
Nie chcę podawać	5	3,8
Wiek [lata]		
18–19	15	11,4
20–21	40	30,5
22–23	50	38,1
24–25	18	13,8
Wydział		
Matematyki i Informatyki Technicznej	36	27,5
Elektrotechniki i Informatyki	16	12,2
Mechaniczny	34	26,0
Budownictwa i Architektury	16	12,2
Zarządzania	12	9,2
WIS	17	13,0
Studia		
I stopień	107	81,7
II stopień	20	15,3
III stopień	4	3,1

ŹRÓDŁO: oprac. własne.

7. Wyniki badań

Przeprowadzone badania pokazały, że aż 98% ankietowanych (128 osób) podczas uczenia się korzysta z narzędzi wspomaganych sztuczną inteligencją. Wśród używanych przez studentów aplikacji AI niezaprzeczalnym liderem był Chat GPT, który został wskazany przez 90,8% respondentów (119 osób). Dużo mniej studentów w trakcie uczenia się wykorzystuje inne aplikacje (wykres. 1).



WYKRES 1. Narzędzia sztucznej inteligencji wykorzystywane przez studentów PL

ŹRÓDŁO: oprac. własne.

Studenci najczęściej wykorzystują AI w przygotowaniu się do zajęć (58%), do rozwiązywania problemów (48,9%), robienia notatek (37%), tłumaczenia tekstów (35,9%) i generowania programów/obrazów (32,8%). Mniej niż 30% badanych używa aplikacji wspomaganych sztuczną inteligencją do pisania dokumentów, weryfikacji i analizy danych oraz wyszukiwania literatury. Nieliczni respondenci (poniżej 15%) wykorzystują AI do personalizowania materiałów, interakcji czy symulacji (wykres 2). To potwierdza prawdziwość hipotezy H1.

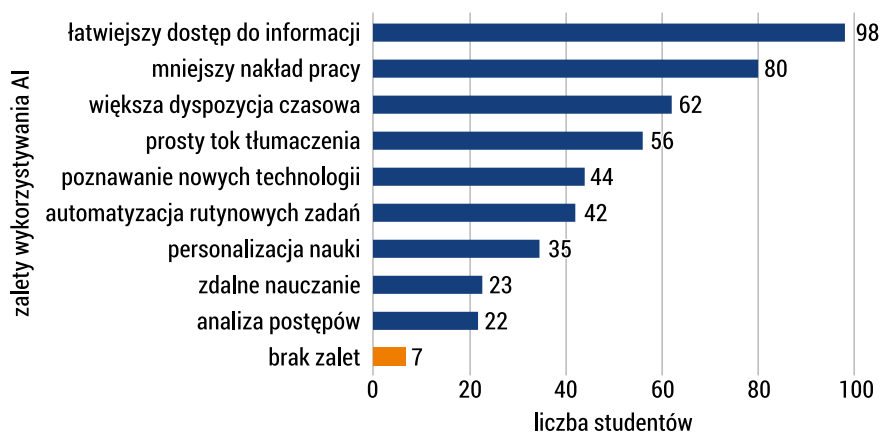


WYKRES 2. Cele wykorzystywania AI wskazane przez studentów PL

ŹRÓDŁO: oprac. własne.

Studenci chętnie sięgają po narzędzia wspomagane AI podczas nauki, gdyż dostrzegają ich zalety, takie jak: łatwiejszy dostęp do informacji (74,8%), zmniejszenie nakładu pracy (61,1%), większa dyspozycyjność czasowa (47,3%) i prosty tok tłumaczenia przekazywanych treści (42,7%). Około jedna trzecia badanych studentów używa aplikacji wspomaganych sztuczną inteligencją, bo pozwala im to rozwijać umiejętności

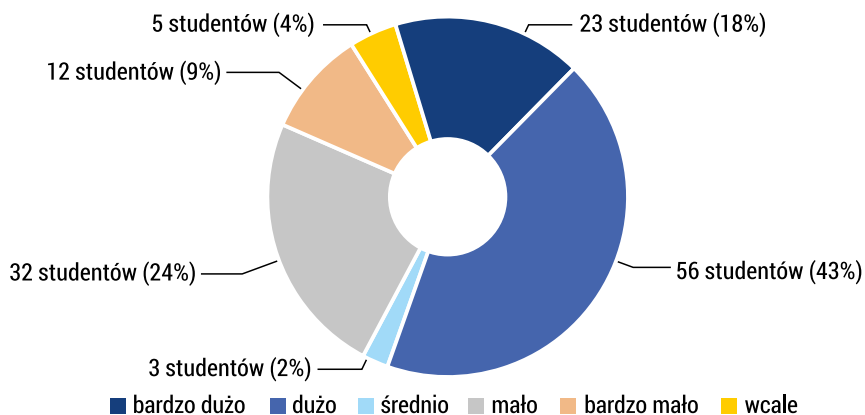
przyszłości (poznawanie nowych technologii). Mniejsza część respondentów widzi również możliwość wykorzystania narzędzi AI do automatyzacji rutynowych zadań (32,1%), personalizacji nauki (26,7%), nauczania zdalnego (17,6%) oraz analizy postępów (16,8%). Aż 5,4% badanych nie dostrzega żadnych zalet wykorzystania sztucznej inteligencji w procesie uczenia się (wykres 3).



WYKRES 3. Zalety wykorzystywania narzędzi AI wskazane przez studentów PL

ŹRÓDŁO: oprac. własne.

W odpowiedzi na pytanie dotyczące korzyści z wykorzystania narzędzi AI w procesie uczenia się ponad połowa studentów Politechniki Lubelskiej wyraziła przekonanie, że pozwalają im one zaoszczędzić bardzo dużo (18%) lub dużo czasu (43%). Tylko 4% respondentów (5 osób) nie dostrzega zależności pomiędzy używaniem AI a szybszą nauką i efektywnym wykorzystywaniem czasu (wykres 4).



WYKRES 4. Czas zaoszczędzony przez studentów PL dzięki wykorzystaniu narzędzi AI w procesie uczenia się

ŹRÓDŁO: oprac. własne.

Studenci Politechniki Lubelskiej dostrzegają także zagrożenia związane z wykorzystaniem sztucznej inteligencji w procesie uczenia się (wykres 5). Aż 74% respondentów obawia się spadku zdolności samodzielnego myślenia wynikającego z ułatwień niesionych przez sztuczną inteligencję. Ponadto 61% badanych zauważa, że niektóre dane generowane przez AI są nierzetelne lub są źródłem „halucynacji” systemu. Zatem istnieje konieczność szczegółowego weryfikowania informacji dostarczanych przez AI, co zostało uznane za jedną z głównych wad tych technologii przez ponad połowę ankietowanych (52,7%).



WYKRES 5. Wady narzędzi AI dostrzegane przez studentów PL

ŹRÓDŁO: oprac. własne.

Interesujące jest to, że jedynie 22,1% respondentów dostrzega ryzyko naruszenia prywatności i bezpieczeństwa informacji przy korzystaniu ze sztucznej inteligencji. Zaledwie 13% badanych widzi możliwość negatywnego wpływu narzędzi AI na zdrowie fizyczne, a 9,9% – na zdrowie psychiczne. Jednocześnie aż 6,1% respondentów bezkrytycznie używa sztucznej inteligencji podczas uczenia się, nie dostrzegając żadnych jej wad. Wskazuje to na ograniczoną świadomość zagrożeń związanych z wykorzystywaniem sztucznej inteligencji w procesie uczenia się wśród studentów Politechniki Lubelskiej. Chociaż znaczna ich część zdaje sobie sprawę z wielu jej zagrożeń. Potwierdza to prawdziwość hipotez H2 i H3.

8. Podsumowanie

Przeprowadzone badania pokazały dużą popularność narzędzi wspomaganych sztuczną inteligencją podczas procesu uczenia się studentów Politechniki Lubelskiej. Chętnie wykorzystują oni nowoczesne technologie w swojej edukacji,

mimo że towarzyszą im pewne obawy dotyczące jakości uzyskiwanych informacji oraz wpływu korzystania z AI na samodzielne myślenie. Potrafią znaleźć szerokie zastosowanie dla aplikacji wspomaganych sztuczną inteligencją w celu usprawnienia swojego procesu uczenia się. Są świadomi licznych zalet wykorzystania AI w edukacji, w tym możliwości skrócenia czasu potrzebnego na naukę czy łatwiejszego dostępu do informacji. Studenci dostrzegają też niektóre wady używania narzędzi wspomaganych sztuczną inteligencją, a jednocześnie nie są świadomi wszystkich związanych z tym zagrożeń.

W celu zwiększenia świadomości studentów i poprawy efektywności ich nauki wskazane byłoby przekazywanie im wiedzy na temat możliwości wykorzystywania sztucznej inteligencji w procesie uczenia się, istniejących zagrożeń wynikających z nieodpowiedzialnego korzystania z AI oraz wiarygodnych źródeł wiedzy na ten temat. Można to robić nie tylko w ramach przedmiotów uwzględnionych w programach studiów, lecz także podczas seminariów i spotkań kół naukowych oraz w mediach społecznościowych.

Wyniki badań mogłyby wskazać popularność innych zastosowań AI w procesie uczenia się lub inny poziom świadomości jej wykorzystania, gdyby były przeprowadzone wśród studentów różnych uczelni wyższych, a nie tylko uczelni technicznej, jaką jest Politechnika Lubelska. Dlatego w przyszłości planowane jest powtórzenie badań wśród studentów innych lubelskich uczelni.

Literatura

- [1] Babbie E., *Podstawy badań społecznych*, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 2012.
- [2] Buraczyńska B., *Elastyczność w funkcjonowaniu przedsiębiorstw handlowych w sektorze e-commerce. Zarządzanie elastycznością przedsiębiorstw internetowych*, Politechnika Lubelska, Lublin 2022.
- [3] Chat GPT, <https://chatgpt.com/> [dostęp: 19.05.2024].
- [4] Maziarski M., *Edukacja medialna X.0 – kształtowanie myślącego człowieka*, [w:] *Sztuczna inteligencja. Prawdziwe zmiany w edukacji?*, red. J. Pyżalski, A. Łuczyńska, Fundacja Szkoła z Klasą, Warszawa 2024, s. 14–23.
- [5] Staniszewski M., Rębacz M., Organista E., Kołodyński A., Buraczyńska B., *Garden of the Future – the Internet of Things in Managing Home Crop*, [w:] *Współczesne problemy prawa, zarządzania, bezpieczeństwa i nowoczesnej inżynierii*, red. K. Huczek, M. Ścigała, J. Żylińska, K. Gawkowski, P. Przybylski, 2023, s. 534–548.
- [6] Pyżalski J., *Co generatywna sztuczna inteligencja może zrobić z edukacją i od czego zależy?*, [w:] *Sztuczna inteligencja. Prawdziwe zmiany w edukacji?*, red. J. Pyżalski, A. Łuczyńska, Fundacja Szkoła z Klasą, Warszawa 2024, s. 24–28.
- [7] Raja S., Jebadurai D.J., Ivan L., Mykola R.V., Ruslan K., Nadiia P.R., *Impact of Artificial Intelligence in Students' Learning Life*, „AI in Business: Opportunities and Limitations” 2024, vol. 2, s. 3–17.
- [8] Różanowski K., *Sztuczna inteligencja: rozwój, szanse i zagrożenia*, „Zeszyty Naukowe Warszawskiej Wyższej Szkoły Informatyki” 2007, nr 2, s. 109–135.

- [9] Rybiński K., Królewski J., *Algokracja. Jak i dlaczego sztuczna inteligencja zmieni wszystko?*, PWN, Warszawa 2023.
- [10] Sasikala P., Ravichandran R., *Study on the Impact of Artificial Intelligence on Student Learning Outcomes*, „Journal Digital Learning Education” 2024, vol. 4, s. 145–155.
- [11] Sysło M.M., *Sztuczna Inteligencja*, „E-mentor” 2022, nr 4(16).
- [12] *Sztuczna inteligencja*, Centralna Biblioteka Statystyczna. GUS – Portal Informacyjny, <https://cbs.new.stat.gov.pl/zbiory/sztuczna-inteligencja> [dostęp: 1.10.2024].
- [13] Zalewska-Bochenko A., *Sztuczna inteligencja w procesie edukacji*, „Optimum. Economic Studies” 2024, nr 2(116), s. 194–210.

Key words: artificial intelligence, learning support, AI tools, technology awareness, digital education

Zastosowanie metod uczenia maszynowego w diagnozowaniu psychiatrycznym

Karolina Gajowiak, Diana Morzhak, Mateusz Walo, Magdalena Piłat-Rożek

Koło Naukowe Atlas, Politechnika Lubelska

1. Wstęp

Wiele osób w dzisiejszym świecie boryka się z problemami psychicznymi. Szacuje się, że jedna na siedem osób zmaga się z zaburzeniami psychicznymi, a w wielu wypadkach pozostają one niezdiagnozowane aż do śmierci pacjenta. Zaburzenia psychiczne, których skutkiem są często próby samobójcze, stanowią przyczynę jednego na sto zgonów u osób przed pięćdziesiątym rokiem życia. Do najczęściej występujących zaburzeń psychicznych zaliczane są: depresja, choroba afektywna dwubiegunowa, zaburzenia lękowe i schizofrenia [1]. W związku ze wzrastającą liczbą zachorowań zwiększa się również zapotrzebowanie na wyspecjalizowanych psychiatrów i psychologów, którzy będą w stanie pomóc potrzebującym pacjentom. W tym celu opracowano narzędzie – aplikację webową do diagnozy psychiatrycznej za pomocą metod uczenia maszynowego takich jak sieć neuronowa – które może zdiagnozować pacjenta, aby pomóc lekarzom w jego poprawnym leczeniu.

2. Opis problemu chorób psychicznych

Zdrowie psychiczne odgrywa niezwykle ważną rolę w ogólnym samopoczuciu i dobrostanie człowieka. Zaburzenia tej natury mogą znacząco wpływać na jakość życia, a w bardziej zaawansowanych stanach nawet utrudniać codzienne funkcjonowanie. Kluczowe jest więc dbanie o swoją kondycję umysłową. Warto zwrócić uwagę na takie czynniki jak: odpowiednia ilość snu i odpoczynku, prawidłowe nawyki żywieniowe, unikanie używek czy wprowadzenie aktywności fizycznej do swojego harmonogramu dnia.

Mianem choroby psychicznej określa się stan, w którym występują zaburzenia myśli, emocji lub zachowań prowadzące do cierpienia dotkniętej nią osoby. Problemy psychiczne mogą być stałe, nawracające bądź występować jako pojedynczy epizod. Przyczyn ich powstania jest wiele. Istnieje natomiast podział, który

znacznie ułatwia powierzchowną identyfikację źródła problemu. Choroby powstałe w wyniku uwarunkowań genetycznych nazywa się endogennymi zaburzeniami psychicznymi. Najczęściej są to schizofrenia i psychoza maniakalno-depresyjna, inaczej choroba afektywna dwubiegunowa [1]. Natomiast choroby egzogenne (psychoza alkoholowa, zespół majaczeniowy oraz splątaniowy) zostały wywołane przez czynniki zewnętrzne, takie jak nadużywanie leków, alkoholu bądź innych środków psychoaktywnych, a także przebieg ciężkich chorób somatycznych. Istnieją dużo bardziej szczegółowe podziały i klasyfikacje zaburzeń natury psychicznej, takie jak DSM-5, ICD-10 czy ICD-11 [2]. Jednak nie są one ścisłe, a same klasyfikacje powstały głównie ze względów praktycznych, aby ułatwić postępowanie medyczne, prawne i społeczne. Klasyfikacje chorób nie są sztywne, ponieważ zaburzenia natury psychicznej często zawierają w sobie objawy charakterystyczne dla innych chorób tej natury. Między innymi z tego powodu pomocy zawsze należy szukać u specjalisty, a różnego rodzaju testy czy aplikacje traktować tylko jako wskazówkę, a nie pełną diagnozę.

3. Materiały i metody

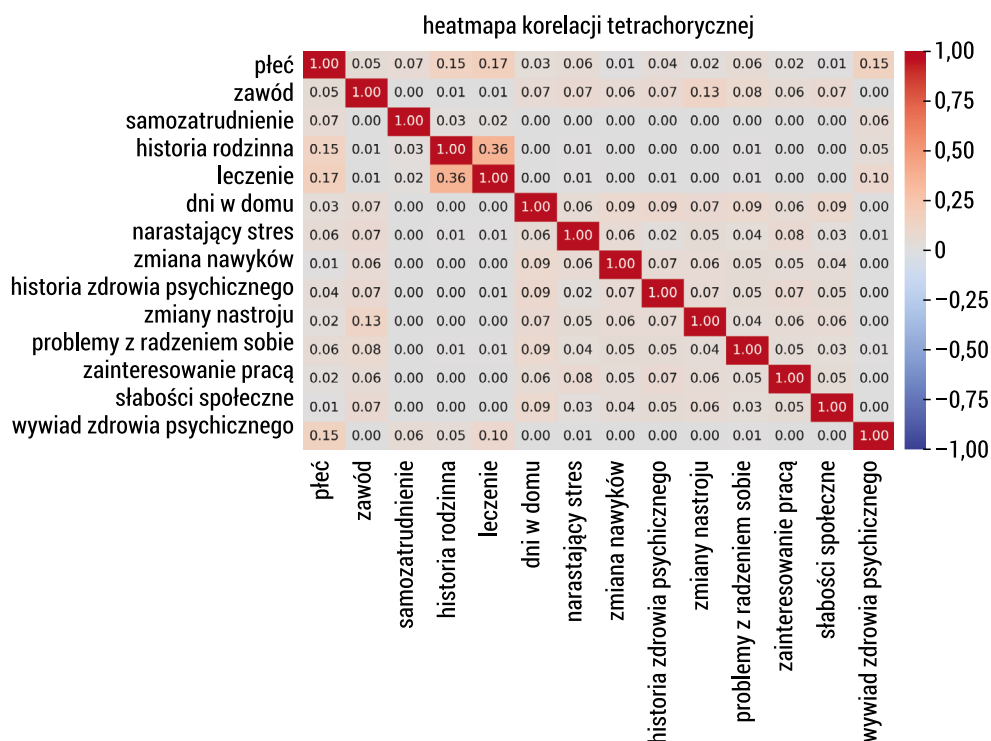
W celu opracowania narzędzia opierającego się na metodach uczenia maszynowego, które pozwala na prawidłową diagnozę pacjenta, posłużono się danymi pochodzącymi z platformy Kaggle. Zawierały one informacje o stanie zdrowia psychicznego około 300 000 pacjentów z całego świata na podstawie informacji o miejscu zamieszkania, płci, typie zatrudnienia, zawodzie, historii chorób psychicznych w rodzinie, stresie, liczbie dni spędzonych na świeżym powietrzu oraz zmianie nawyków.

W badaniach użyto języka Python w wersji 3.11 oraz Jupyter Lab w celu korzystania z tego języka [3]. Po przeprowadzeniu eksploracyjnej analizy zbioru danych polegającej na prawidłowej imputacji braków, w przypadku tego zbioru z uwagi na niewielkie zaburzenia rozkładu uzupełnionych danych, została zastosowana metoda imputacji modą. W eksploracyjnej analizie danych wykorzystano również ich preprocessing, w którym poprawiono typy danych, aby były odpowiednie do modelowania, oraz zmieniono pewne zmienne kategoryczne na binarne za pomocą metody One Hot Encoding. Polega ona na zamianie wartości zmiennej kategorycznej, które nie są uporządkowane w żadnej skali, na odpowiadające im nowe zmienne przyjmujące wartości 0 lub 1. Podczas preprocessingu danych usunięto obserwacje odstające, których autentyczność i wiarygodność w kontekście całego zbioru danych były wątpliwe. Przypadki obserwacji odstających powstają wtedy, gdy przypadkowo osoby, które miały wypełnić formularz na temat swojego zdrowia psychicznego, zrobiły to niedbale lub podały informacje niezgodne z aktualnym stanem ich zdrowia. Po nadaniu odpowiedniej struktury danym wybrano obszar geograficzny – Stany Zjednoczone, na którym przeprowadzono modelowanie. Podjęto taką decyzję w celu zmniejszenia różnic kulturowych, społecznych i innych czynników,

które są powiązane z miejscem zamieszkania danego pacjenta. Czynniki te stanowiłyby losowy szum podczas modelowania. Została sprawdzona korelacja V Cramera pomiędzy nimi w celu pokazania zależności między poszczególnymi zmiennymi w danych. Wzór na korelację V Cramera, zwaną również korelacją tetrachoryczną, prezentuje się następująco

$$V = \sqrt{\frac{\chi^2}{n \cdot \min(k-1, r-1)}}, \quad (1)$$

gdzie: χ^2 jest wynikiem statystyki chi kwadrat, n to łączna liczba obserwacji, k – liczba kolumn w tabeli kontyngencji i r – liczba wierszy w tabeli kontyngencji. Tę korelację zaprezentowano na rys. 1.



RYS. 1. Korelacja tetrachoryczna między zmiennymi

ŹRÓDŁO: oprac. własne.

Najwyższą korelację tetrachoryczną między zmienną predykowaną *treatment* (leczenie) ma zmienna *family_history* (historia rodzinna), która wskazuje na to, czy w rodzinie badanego występowała wcześniej choroba psychiczna.

Z uwagi na fakt, że zmienna przewidywana *treatment* (leczenie) miała niezbalansowany rozkład klas chory i zdrowy, na zbiorze treningowym zastosowano też metodę

równoważenia klas SMOTE [4]. Wytwarza ona syntetyczne próbki danych, bazując na podobieństwie cosinusowym między zmiennymi. Stosuje się ją, robiąc tzw. *upsampling* w celu zbalansowania klas. Wówczas modele mają więcej danych, dzięki którym mogą nauczyć się schematów przynależności do danych klas [5].

Po uprzednim przygotowaniu danych zostały zbudowane modele przewidujące zmienną binarną *treatment* (leczenie), by spróbować odpowiedzieć na pytanie, czy pacjent może być w przyszłości chory czy zdrowy. Wytrenowano następujące modele należące do dziedziny klasycznego uczenia maszynowego: drzewo decyzyjne, las losowy, metoda wektorów nośnych, regresja logistyczna, klasyfikator XGBoost, model k najbliższych sąsiadów oraz sieć neuronowa [6], [7], [8].

Sieć neuronowa została zbudowana za pomocą biblioteki TensorFlow kompatybilnej z językiem programowania Python dzięki funkcjonalnemu API Keras [9], [10]. Architektura sieci, która została użyta w tej pracy, bazuje na modelu Sequential, który układa warstwy kolejno na sobie w stos. W sieci wykorzystano też inne warstwy:

- wejściową, zawierającą 64 neurony i mającą kształt wejściowy odpowiadający kształtowi zbioru treningowego X; do aktywowania tej warstwy została użyta funkcja ReLU;
- ukrytą gęstą, mającą połączenia z każdym z neuronów znajdujących się w poprzedniej warstwie, zawierającą 32 neurony, aktywowaną za pomocą ReLU;
- wyjściową gęstą, aktywowaną funkcją sigmoidalną w celu zwrócenia przez sieć prawdopodobieństwa przynależności do danej klasy (chory, zdrowy).

Model sieci neuronowej został skompilowany za pomocą optymalizatora Adam, który dynamicznie adaptuje się do wag podczas trenowania sieci z parametrem uczenia się równym 0,001. Sieć była trenowana przez 20 epok z parametrem liczby jednocześnie podawanych próbek (*batch size*) równym 32.

Drugim najlepszym modelem okazało się drzewo decyzyjne, którego parametry zostały dostrojone za pomocą metody losowego przeszukiwania parametrów. Jego algorytm został zaimportowany z biblioteki Scikit-learn, kompatybilnej z językiem programowania Python [11]. Mechanizm działania drzewa decyzyjnego jest następujący: na początku wybierana jest zmienna i ustalana dla niej waga, która najlepiej dzieli zbiór danych na najbardziej podobne względem „czystości”, dzięki temu podziałowi powstają dwie gałęzie drzewa. Ten proces jest powtarzany za pomocą rekurencji w drzewie do momentu, kiedy poszczególne grupy są wystarczająco jednorodne lub osiągną maksymalną głębokość drzewa. Następnie gałęzie dzielą się na liście i każdy z nich reprezentuje konkretną decyzję drzewa. W celu predykcji nowego pacjenta jego dane są przepuszczane przez całe drzewo i podawane jest prawdopodobieństwo, że wybrany pacjent trafił do danego liścia.

W celu przewidzenia ryzyka choroby psychicznej u pacjentów postawiono zadanie klasyfikacji binarnej. W związku z tym do oceny wydajności przetestowanych modeli zastosowano odpowiednie metryki klasyfikacji [4]. Wśród metod ewaluacyjnych znalazły się m.in.:

- macierz pomyłek – przedstawia liczbę poprawnie i niepoprawnie zdiagnozowanych osób przez badany model uczenia maszynowego. Wyróżnia się w niej takie kategorie jak:
 - TN (*True Negatives*), czyli liczba osób zdrowych zdiagnozowanych przez model jako zdrowe,
 - TP (*True Positives*), czyli liczba osób chorych zdiagnozowanych jako chore,
 - FN (*False Negatives*), czyli liczba osób chorych zdiagnozowanych jako zdrowe,
 - FP (*False Positives*), czyli liczba osób zdrowych zdiagnozowanych przez model jako chore. Zdefiniowane kategorie stanowią podstawę obliczeń metryk przedstawionych poniżej;
- dokładność klasyfikacji (ang. *accuracy*) – metryka oceny modelu klasyfikacyjnego reprezentująca stosunek liczby poprawnie dokonanych predykcji diagnoz do całkowitej liczby dokonanych predykcji diagnoz pacjentów przez model. Dokładność klasyfikacji opiera się na wynikach macierzy pomyłek w następujący sposób:

$$Accuracy = \frac{TP + TN}{TP + TN + FP + FN} \quad (2)$$

- precyzja (ang. *precision*) – metryka służąca do wyznaczenia poprawności klasyfikacji dokonywanej przez dany model. Obliczamy ją w następujący sposób:

$$Precision = \frac{TP}{TP + FP} \quad (3)$$

- czułość (ang. *recall*) – metryka określająca zdolność modelu do wykrywania próbek pozytywnych. W danym przypadku oznacza to zdolność modelu do poprawnego zdiagnozowania osób chorych. Czułość obliczamy następująco:

$$Recall = \frac{TP}{TP + FN} \quad (4)$$

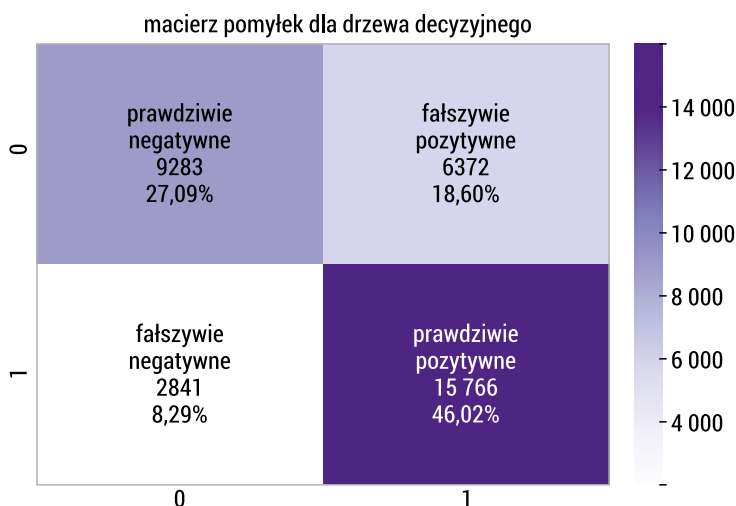
- wynik F1 – metryka będąca średnią harmoniczną wartości precyzji i czułości. Obliczamy ją na podstawie następującego wzoru:

$$F1 = 2 \cdot \left(\frac{Precision \cdot Recall}{Precision + Recall} \right) \quad (5)$$

- krzywa ROC (*Receiver Operating Characteristic*) – graficzna reprezentacja wydajności modelu klasyfikacyjnego, wykorzystana do wizualizacji klasyfikatora binarnego.

4. Wyniki

Drzewo poradziło sobie dobrze dzięki dostrojeniu takich parametrów jak jego maksymalna głębokość, minimalny podział liści i ich minimalna liczba. Na rys. 2 zaprezentowany został wynik klasyfikacji pacjentów przez dostrojone drzewo, a na rys. 3 wskazane przez nie najważniejsze predyktory.



RYS. 2. Macierz pomyłek dla drzewa decyzyjnego dostrojonego metodą losowego przeszukiwania parametrów

ŹRÓDŁO: oprac. własne.



RYS. 3. Ważność predyktorów w drzewie decyzyjnym dostrojonym metodą losowego przeszukiwania parametrów

ŹRÓDŁO: oprac. własne.

Warto zauważyć, że drzewo za zmienną, która miała największy wpływ na predykcję, uznało *family_history* (historia rodzinna), która miała również największą korelację tetrachoryczną ze zmienną predykowaną.

Wymienione w materiale i metodach metryki zostały obliczone dla każdego z przetestowanych modeli uczenia maszynowego. Uzyskane na ich podstawie wyniki umożliwiły porównanie efektywności wykorzystania poszczególnych modeli w zadaniu klasyfikacyjnym.

TABELA 1. Końcowe metryki na zbiorze testowym modeli uczenia maszynowego

Model	Wynik F1	Dokładność klasyfikacji
Sieć neuronowa	77,546018	72,462203
Drzewo decyzyjne (RandomSearch)	77,388637	73,110151
Drzewo decyzyjne (GaussianCV)	77,388637	69,523087
Las losowy (RandomSearch)	77,232538	70,436635
Klasyfikator XGBoost	76,744473	72,462203
Metoda wektorów nośnych	75,570194	71,207168
Regresja logistyczna	74,549457	70,982430
Las losowy	74,428820	70,436635
Klasyfikator drzewa decyzyjnego	73,287286	69,523087
Model k najbliższych sąsiadów	70,129803	66,149086

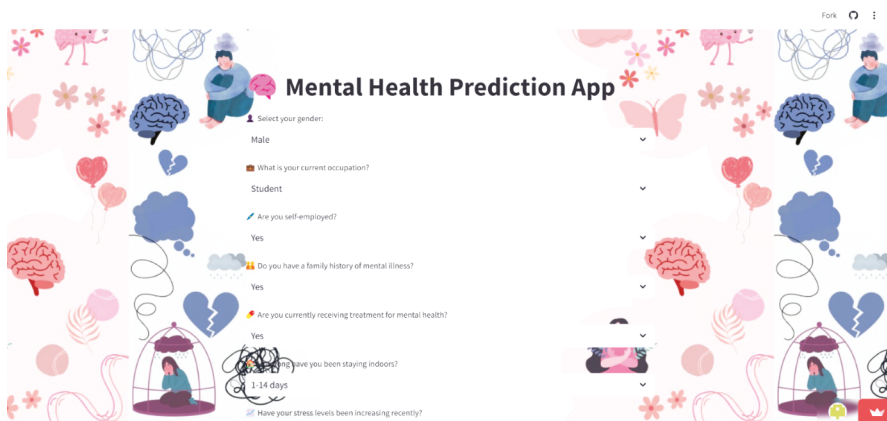
ŹRÓDŁO: oprac. własne.

Na podstawie tabeli 1 można stwierdzić, że najwyższe wartości metryk F1 oraz dokładności klasyfikacji uzyskano w przypadku sieci neuronowej i drzewa decyzyjnego dostrojonego metodą losowego przeszukiwania parametrów. Wyniki te wskazują na wysoką skuteczność stosowania modeli uczenia maszynowego pod kątem klasyfikacji binarnej w diagnozowaniu psychiatrycznym, a najbardziej efektywna sieć neuronowa została wykorzystana do stworzenia aplikacji predykcyjnej wspomagającej diagnozę psychiatryczną.

5. Podsumowanie

Analiza danych pozwoliła na określenie zależności między cechami pacjentów z kluczową korelacją między zmienną *family_history* a zmienną docelową *treatment*, co podkreśla znaczenie historii rodzinnej w ocenie ryzyka chorób psychicznych. Dodatkowo z powodu niezerównoważonego rozkładu klasy docelowej (chory/zdrowy) zastosowano metodę SMOTE, co pozwoliło na bardziej zrównoważone wyniki predykcyjne i większą skuteczność modelu. Na podstawie końcowych metryk wybrano

najlepiej klasyfikujący model – sieć neuronową. Została ona wykorzystana w aplikacji, dzięki której użytkownik może się dowiedzieć, jakie ma ryzyko wystąpienia choroby psychicznej w przyszłości.



RYS. 4. Interfejs aplikacji do predykcji wystąpienia chorób psychicznych

ŹRÓDŁO: oprac. własne.

Dzięki interfejsowi aplikacji ukazanej na rys. 4 użytkownik może odpowiedzieć na pytania, a na ich podstawie model prognozuje, czy potrzebna będzie pomoc psychiatryczna. Opracowane rozwiązanie może zrewolucjonizować opiekę zdrowotną, umożliwiając wszechstronne analizy i prognozy medyczne z użyciem modeli uczenia maszynowego. Takie modele mogłyby wspierać personel jako asystenci diagnostyczni. Na przykład progi pewności wyświetlane w aplikacji pozwoliłyby pacjentom szybciej planować wizyty, co umożliwiłoby wcześniejsze rozpoczęcie leczenia i zmniejszenie ryzyka pogorszenia zdrowia.

Literatura

- [1] Wittchen H.U. et al., *The Size and Burden of Mental Disorders and Other Disorders of the Brain in Europe 2010*, „European Neuropsychopharmacology” 2011, vol. 21(9), s. 655–679, doi:10.1016/j.euroneuro.2011.07.018.
- [2] World Health Organization, *International classification of diseases (11th revision)*, 2019.
- [3] Rossum G. van, Drake F.L., *Python 3 Reference Manual*, Scotts Valley 2009.
- [4] Mukherjee M., Khushi M., *SMOTE-ENC: A Novel SMOTE-Based Method to Generate Synthetic Data for Nominal and Continuous Features*, „Applied System Innovation” 2021, vol. 4, 18.
- [5] Wang Y., Zhang G., Wang S., Li B., Liu Q., Hui L., Dai Y., *Improving Depth Completion via Depth Feature Upsampling*, [w:] *Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, 2024.

- [6] Krysiak K., *Complete Guide to Decision Trees, Random Forest, and XGBoost*, DSLab, Uniwersytet Warszawski, Warszawa 2019.
- [7] Krysiak K., *Support Vector Machines and Classification*, DSLab, Uniwersytet Warszawski, Warszawa 2019.
- [8] Bishop C.M., *Pattern Recognition and Machine Learning*, Springer, New York 2006.
- [9] Shukla N., *Machine Learning with TensorFlow*, Manning Publications, 2020.
- [10] Byeon H., Prashant G.C., Hannan S.A., Alghayadh F.Y., Soomar A.M., Soni M., Bhatt M.W., *Deep neural network model for enhancing disease prediction using auto encoder based broad learning*, „SLAS Technology” 2024, vol. 29(3), doi:10.1016/j.slast.2024.100145.
- [11] Pedregosa F., Varoquaux G., Gramfort A., Michel V., Thirion B., Grisel O. et al., *Scikit-learn: Machine learning in Python*, „Journal of Machine Learning Research” 2011, vol. 12, s. 2825–2830.
- [12] Novaković J.D., Veljović A., Ilić S.S., Papić Ž., Tomović M., *Evaluation of Classification Models in Machine Learning*, „Theory and Applications of Mathematics & Computer Science” 2017, vol. 7(1), s. 39–46.

Key words: machine learning, statistics, predictive modeling, deep learning

Fotografia interdyscyplinarna

Klaudia Anna Kojro, Ewelina Łobacz, Alina Krysztapowicz, Virsaviya Dubrounaya

Studenckie Koło Naukowe „Ciemnia”, Politechnika Białostocka

1. Wstęp

Fotografia jako medium artystyczne, narzędzie dokumentacyjne i środek komunikacji od momentu swojego powstania odgrywa istotną rolę w rozwoju kultury, nauki i technologii [1]. Jej początki są nierozzerwalnie związane z przełomowymi osiągnięciami w dziedzinie chemii, fizyki i optyki, które umożliwiły zarejestrowanie obrazu na trwałym nośniku. Proces ten trwał przez wieki, od pierwszych eksperymentów z kamerą obscurą po wynalezienie fotografii w XIX wieku, odzwierciedlał dążenie człowieka do uchwycenia i utrwalenia otaczającej go rzeczywistości. Od tamtego czasu fotografia ewoluowała, przechodząc przez różne etapy technicznego i artystycznego rozwoju – od dagerotypii przez fotografię analogową opartą na materiałach światłoczułych aż po współczesną erę cyfrową. Każdy z tych etapów przyniósł nowe możliwości, ale także zmienił sposób, w jaki ludzie postrzegają sztukę rejestrowania obrazu. Wraz z rozwojem fotografii cyfrowej jej analogowa wersja została niemal całkowicie wyparta, choć wiele osób nadal docenia tradycyjne techniki za ich niepowtarzalny charakter, precyzję oraz czasochłonność, która wymusza skupienie i refleksję.

Dziś niemal każdy ma w swoim telefonie aparat zdolny do uchwycenia i przechowywania tysięcy obrazów, bez konieczności korzystania ze skomplikowanych procesów chemicznych, ciemni czy znajomości zasad działania emulsji światłoczułych. Ta łatwość dostępu i wszechobecność fotografii cyfrowej sprawiają, że rzadziej wracamy do korzeni tej sztuki, zapominamy o jej interdyscyplinarnym charakterze oraz naukowych i artystycznych podstawach, które pozwoliły na jej rozwój. Projekt „Fotografia interdyscyplinarna” powstał, aby połączyć tradycyjne i nowoczesne metody rejestrowania obrazu, przybliżyć odbiorcom zarówno historyczne, jak i współczesne aspekty fotografii. Inicjatywa ta miała na celu nie tylko przypomnienie o trudach i pięknie analogowych technik fotograficznych, lecz także zwrócenie uwagi na ich wartość w kontekście współczesnej sztuki i nauki. W ramach projektu podjęliśmy próbę zrozumienia, jak oba podejścia mogą się wzajemnie uzupełniać, tworząc nową przestrzeń dla kreatywności i eksploracji wizualnej. Celem tego artykułu jest szczegółowe omówienie procesów twórczych i technologicznych, które towarzyszyły realizacji projektu, a także wyzwaniom, z jakimi dane nam było się zmierzyć. Analiza tych

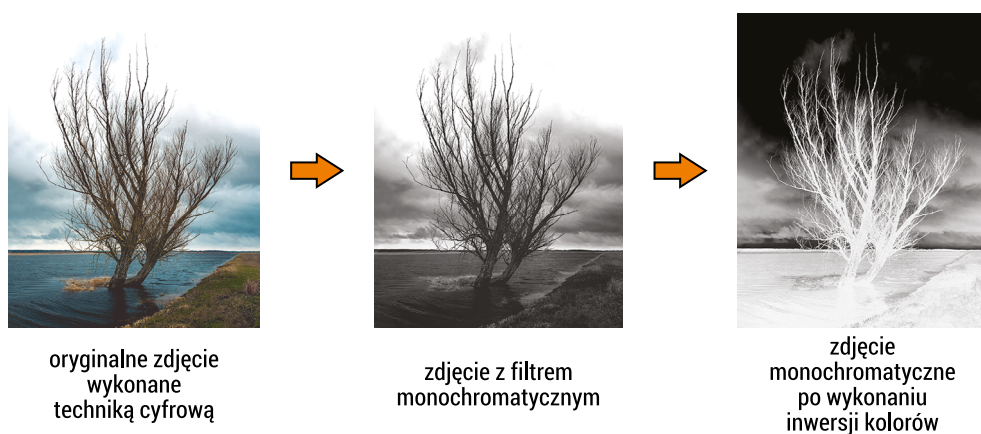
trudności, zarówno technicznych, jak i koncepcyjnych, pozwala na lepsze zrozumienie, jak fotografia, pomimo swojej zmieniającej się formy, pozostaje jedną z najważniejszych dziedzin łączących naukę, technologię i sztukę.

2. Materiały i metodyka

Pierwszym etapem naszych badań było przygotowanie zdjęć cyfrowych, które miały stać się obiektem opracowania w technice analogowej. Zależało nam na wykorzystaniu tych zdjęć do stworzenia negatywów wielkoformatowych, dlatego wybraliśmy te w dużej rozdzielczości. Następnie przetworzyliśmy je w programie do obróbki plików graficznych Adobe Photoshop. Proces ten polegał na przekształceniu zdjęć w obrazy monochromatyczne, co oznaczało eliminację wszystkich informacji o barwach innych niż czern i biel. Dzięki temu uzyskaliśmy obrazy o wyraźnym kontraście tonalnym. Kolejnym krokiem było odwrócenie kolorów w przygotowanych fotografiach. W tym procesie ciemne obszary zdjęć zostały zamienione na jasne, a jasne elementy zmieniły się w różne odcienie czerni. Takie odwrócenie tonalne było niezbędne, aby przygotowane obrazy mogły pełnić funkcję negatywów. Dodatkowo dostosowany został rozmiar do wymiarów 50×70 cm oraz rozdzielczość 300 DPI. W celu przeniesienia przygotowanych fotografii z formy cyfrowej na fizyczny nośnik zdecydowaliśmy się na współpracę z drukarnią. W wyborze materiału kierowaliśmy się cechami filmu fotograficznego. W tradycyjnych błonach fotograficznych nośnikiem emulsji światłoczułej jest tworzywo sztuczne o wysokiej przejrzystości, ponieważ pozwala to na swobodne przechodzenie światła przez wywołany obraz, co jest kluczowe dla jakości reprodukcji. Przezroczysty nośnik również eliminuje ryzyko pochłaniania światła, co mogłoby wpłynąć na prawidłowe oddanie kontrastu i tonów. Kolejną pożądaną cechą była także wysoka wytrzymałość nośnika. Wszystkie te cechy ma politereftalan etylenu, w skrócie nazywany PET.

Następnym istotnym etapem projektu było przygotowanie podłoża, na którym miały pojawić się zdjęcia. Do eksperymentu wybrano dwa rodzaje: blejtramy malarskie o wymiarach 50×70 cm oraz papiery strukturalne o gramaturze 300 g/m^2 . Aby podłoże było wrażliwe na światło przechodzące przez przygotowane negatywy, należało pokryć wybrany materiał emulsją światłoczułą. Jest to substancja stosowana w fotografii analogowej, która zazwyczaj ma postać zawiesiny i zawiera mikrokryształy halogenków srebra (np. bromek srebra – AgBr). Reakcja chemiczna zachodząca podczas naświetlania emulsji prowadzi do rozpadu cząsteczek halogenków srebra na metaliczne srebro i wolne atomy halogenu ($\text{AgBr} \rightarrow h\nu \text{ Ag} + \text{Br}$). Po działaniu światła w oświetlonych obszarach powstają niewidoczne dla oka małe skupiska metalicznych atomów srebra. Jasne obszary negatywów przepuszczają więcej światła, podczas gdy ciemne obszary blokują je i sprawiają, że emulsja pozostaje nieaktywna. Z tego powodu praca z emulsją wymaga warunków ciemniowych przy obecności oświetlenia ochronnego w postaci żarówki o maksymalnej mocy 15 W z filtrem barwy czerwonej (światło

czerwone ma dłuższą falę niż inne kolory widzialnego spektrum i nie wpływa znacząco na większość materiałów światłoczułych, jednocześnie umożliwia bezpieczną kontrolę procesów chemicznych). Zastosowaliśmy światłoczułą czarno-białą emulsję chlorobromową w płynie o gradacji 3 (normalnej) marki Foma Bohemia. Zgodnie z instrukcją przygotowaną dostarczoną przez producenta dwa rodzaje podłoży zostały umieszczone na płaskiej powierzchni i równomiernie pokryte emulsją za pomocą różnych technik malarskich. Wykorzystaliśmy do tego m.in. pędzle, wałki i gąbki malarskie, by zróżnicować efekt uzyskany na podłożu, jednocześnie uważaliśmy, aby nie powstały pęcherzyki powietrza. Trudnością w tej części było pokrycie całego materiału równomiernie, ponieważ emulsja ma kolor biały, nie było wyraźnie widać, w którym miejscu została już nałożona. Z tego powodu uczestnicy starali się wielokrotnie nałożyć zawiesinę, aby pokryć cały materiał.



RYS. 1. Schemat przygotowania zdjęć do wywołania, fot. Karol Klusewicz

ŹRÓDŁO: oprac. własne.

Po całkowitym wyschnięciu emulsji podłoże było poddane naświetlaniu za pomocą światła górnego jarzeniowego, w przypadku niektórych prac wykorzystano też światło z powiększalnika. Metoda stykowa to technika fotograficzna, w której obraz jest tworzony poprzez bezpośrednie naświetlanie materiału światłoczułego w kontakcie z negatywem. Proces ten opiera się na zasadzie przenoszenia obrazu z negatywu bez korzystania z powiększalnika.

Przy wywoływaniu zdjęć na emulsji światłoczułej czas ekspozycji zależy od grubości jej warstwy, czułości, intensywności światła oraz ilości jasnych elementów na zdjęciu. Gruba warstwa emulsji światłoczułej zawiera więcej halogenków srebra, które muszą ulec naświetleniu m.in. w jej głębszych warstwach, dlatego na naświetlanie podłoża potrzebne jest więcej czasu. Z powyższych powodów każde zdjęcie miało odpowiednio dopasowany czas naświetlania. By go ustalić, przed zrobieniem zdjęć we właściwym formacie wykonano pasek testowy. Polegało to na przyłożeniu negatywu do mniejszego kawałka papieru pokrytego emulsją światłoczułą i dodatkowym

zasłonięciu kawałkiem kartonu, który ma blokować światło przed dotarciem na całą jego powierzchnię, jednocześnie odsłonięto mały kawałek z wierzchu. Następnie naświetlono materiał, odsłaniając coraz więcej negatywu w równych odstępach czasu. Po odkryciu całego paska umieszczono go w kąpielach, które opisane są w dalszej części artykułu. Na tak przygotowanym pasku testowym powstały wyraźnie oddzielone pasy o różnej intensywności otrzymanego obrazu. Z całej gamy wybrano ten najbliższy zamierzonego efektu. Według wykonanych testów średni czas naświetlania wyniósł 10 sekund, z czego negatywy zawierające dużo jasnych elementów potrzebowały mniej czasu, a ciemniejsze więcej, nawet do 30 sekund.

Kolejnym etapem było przygotowanie czterech pojemników o wymiarach minimalnych 55 × 75 cm, w których znalazły się rozpuszczone zgodnie z instrukcją przygotowania dostarczoną przez producenta substancje chemiczne do procesów wywoływania obrazu, przerywania wywoływania, utrwalania obrazu i wypłukania resztek utrwalacza z emulsji światłoczułej.

Najpierw podłoże było płukane w proszkowym wywołyvaczu marki Foma Formatol P Fenal W-14, który wcześniej rozpuszczono w wodzie zgodnie z instrukcjami producenta. Kąpiel ta trwała od 3 do 5 minut.

Stężenie wywoływacza ma istotny wpływ na czas wywoływania materiału światłoczułego, ponieważ określa szybkość reakcji chemicznych zachodzących w tym procesie. Wyższe stężenie wywoływacza powoduje, że reakcje chemiczne przebiegają szybciej, co skraca czas potrzebny na wywołanie obrazu. Proces redukcji halogenków srebra do metalicznego srebra jest wówczas intensywniejszy, co może skutkować wyższym kontrastem, ale także zwiększa ryzyko przerysowania obrazu, czyli utraty detali w jasnych lub ciemnych partiach. Z kolei niższe stężenie wywoływacza spowalnia reakcje chemiczne, wydłużając czas wywoływania. Taka sytuacja sprzyja lepszemu odwzorowaniu szczegółów oraz subtelnych przejść tonalnych, szczególnie w przypadku materiałów o szerokim zakresie dynamicznym. Jednak zbyt niskie stężenie wywoływacza może prowadzić do niedostatecznego wywołania, a w skrajnych przypadkach do uzyskania słabego bądź nierównomiernego obrazu. Kluczowe jest utrzymanie odpowiedniej równowagi – stężenie wywoływacza powinno być dostosowane do charakterystyki materiału światłoczułego oraz pożądanego efektu końcowego.

TABELA 1. Zależności pomiędzy poszczególnymi rodzajami wywoływaczy o różnych stężeniach a materiałami światłoczułymi różnej czułości

Wywoływacz FOMA	Czas wywoływania w temperaturze 20°C			
	Fomapan 100 Classic	Fomapan 200 Creative	Fomapan 400 Action	Retropan 320 Soft
Fomadon LQN (1 + 10)	7–8	5–6	9–10	–
Fomadon LQN (1 + 14)	9–10	7–8	12–13	–
Fomadon LQR (1 + 10)	5–6	5–6	7–8	9–10
Fomadon LQR (1 + 14)	7–8	7–8	9–10	12–13

Wywoływacz FOMA	Czas wywoływania w temperaturze 20°C			
	Fomapan 100 Classic	Fomapan 200 Creative	Fomapan 400 Action	Retropan 320 Soft
Fomadon R 09 (1 + 25)	4	5	6	7–8
Fomadon R 09 (1 + 50)	9	10	12	14–16
Fomadon R 09 (1 + 100)	20–22	24–26	32–34	–
Fomadon P	7–8	5–6	10–11	–
Fomadon Excel	5–6	6–7	7	–
Uniwersalny wywoływacz (1 + 3)	5	3,5	7,5	–
Retro special developer 1 litr	3–4	3–4	3–4	4–5

ŹRÓDŁO: [2]

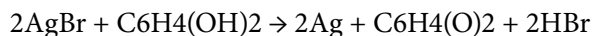
Czas jest elementem zależnym od temperatury i rodzaju materiału światłoczułego. Przed rozpoczęciem wywoływania należy się upewnić, że roztwór roboczy ma odpowiednią temperaturę. Jeśli odbiega ona od zalecanych 20°C, czas wywoływania powinien zostać skorygowany zgodnie z wartościami podanymi w tabeli 2. W sytuacji, gdy podczas wywoływania (szczególnie w dłuższych procesach) nastąpi wyraźna zmiana temperatury wywoływacza, należy ponownie dopasować czas, aby zachować odpowiednią jakość procesu.

TABELA 2. Zależności pomiędzy czasem a temperaturą roztworu

Temperatura	16°C	18°C	20°C	22°C	24°C	26°C
Mnożnik	1,45	1,2	1,0	0,85	0,75	0,6

ŹRÓDŁO: [2]

Podczas procesu wywoływania kluczową reakcją chemiczną jest redukcja halogenków srebra do metalicznego srebra:



co powoduje, że cienie w obrazie stają się jasne, a jasne tony zamieniają się w ciemne.

Następnie wywoływanie obrazu zostało przerwane poprzez zanurzenie go w wodę na 60 sekund. Ten czas jest optymalny, ponieważ pozwala na skuteczne przerwanie redukcji halogenków srebra oraz spłukanie wywoływacza nie tylko z powierzchni papieru, lecz także od wewnątrz, co zapobiega zanieczyszczeniu płynu utrwalającego, w którym będzie zanurzone podłoże. Dodatkowo ten zabieg uniemożliwia degradację obrazu.

Kolejnym etapem było utrwalenie obrazu za pomocą utrwalacza Ilford Rapid Fixer 0,5 l, rozcieńczonego poprzednio z odpowiednią ilością wody, według zaleceń producenta. Reakcją chemiczną zachodzącą podczas tego działania było usuwanie tiosiarczanem sodu niewywołanych halogenków srebra na rzecz metalicznego srebra:



Po utrwalaniu substancje chemiczne pozostające na obrazie zostały spłukane za pomocą wody. Płukanie końcowe było wykonane w wodzie bieżącej o temperaturze 10–20°C przez około 10 minut. Dokładne wypłukiwanie tych substancji jest istotnym procesem, ponieważ zwiększa trwałość uzyskanych obrazów.

3. Wyniki i dyskusja

Podczas realizacji tego projektu napotkaliśmy dość poważny problem. Emulsja światłoczuła podczas procesów chemicznych spływała z powierzchni blejtramów. Zaczęliśmy analizować możliwe przyczyny tego zjawiska i doszliśmy do wniosku, że najprawdopodobniej problem wynikał z właściwości samego blejtramu. Według naszych teorii podczas procesu produkcji jego powierzchnia była pokrywana substancją pełniącą funkcję gruntu, co miało na celu przygotowanie jej pod farby. Grunt ten, choć użyteczny w malarstwie, okazał się nieodpowiedni dla emulsji światłoczułej, uniemożliwiając jej głębsze wnikięcie w strukturę materiału. W rezultacie emulsja nie była na tyle mocno związana z podłożem, by przetrwać intensywne procesy chemiczne powiązane z wywoływaniem obrazu oraz długie kąpiele wodne.

Z tego powodu zdecydowaliśmy się na zmianę materiału. Wybór padł na papier strukturalny o gramaturze 300 g/m² z dodatkiem bawełny. Charakteryzuje się on wyraźną fakturą powierzchni, która nadaje mu artystyczny i unikatowy wygląd. Jest grubszy i sztywniejszy niż standardowy papier, co zwiększa jego trwałość i odporność na uszkodzenia. Jego struktura dobrze absorbuje wszelkie płyny, co zdecydowanie było pożądaną cechą.

Wszystkie prace uzyskane w wyniku naszych działań w ramach projektu „Fotografia interdyscyplinarna” mają wyjątkowy charakter. Dzięki nakładaniu emulsji światłoczułej na podłoże różnymi technikami uzyskaliśmy różną fakturę widoczną na zdjęciach. Przykład takiego efektu możemy zauważyć na rys. 2, na którym widoczne są pociągnięcia pędzla nakładającego zawiesinę. Cały proces charakteryzuje się pewną tajemnicą, gdyż często nie jesteśmy w stanie w pełni przewidzieć końcowego efektu. Poprzez samodzielne przygotowanie podłoża zyskaliśmy dużą swobodę do badań nad efektem, jednak byliśmy też narażeni na problemy wynikające z nasiąknięcia materiału. Pomimo skuteczności papieru strukturalnego przy zakończeniu procesu kąpieli obraz był delikatny i nawet niewielki kontakt mógł wpłynąć na zniekształcenie lub zdrapanie emulsji.



RYS. 2. Jedna z prac autorstwa Klaudii Kojro wykonana na papierze strukturalnym

ŹRÓDŁO: oprac. własne.

Z racji że nasze działania miały na celu artystyczne podejście do procesu twórczego, postanowiliśmy świadomie dać szansę również nieudanym próbom, widząc w nich potencjał do dalszej eksploracji. Miejsca, w których emulsja światłoczuła spłynęła lub nie rozproszyla się równomiernie, uznaliśmy za nowe przestrzenie ekspresji artystycznej i nie potraktowaliśmy ich jako defekty. Dzięki temu każda niedoskonałość stała się inspiracją do uzupełnienia obrazu o dodatkowe elementy, które podkreślały jego niepowtarzalny charakter. W tych obszarach pojawiły się różnorodne działania artystyczne, takie jak spontaniczne maźnięcia pędzlem z farbą, które dodały dynamiki i kolorystycznego kontrastu do monochromatycznej podstawy. Wzbogacono je też haftowanymi detalami, które wprowadziły teksturę. Dodatkowo za pomocą pisaków tworzyliśmy symbole i rysunki, które stanowiły swoisty dialog z resztą kompozycji, nadając pracy osobisty i eksperymentalny wymiar. Takie podejście pozwoliło nam wyjść poza klasyczne granice fotografii i połączyć ją z innymi formami sztuki. Dzięki temu odkryliśmy nowe możliwości kreacyjne, co pokazało, że to, co na pierwszy rzut oka może się wydawać błędem, w rzeczywistości może stać

się fundamentem oryginalnych koncepcji artystycznych. W ten sposób każda praca zyskała unikatowy charakter będący wynikiem połączenia przypadku i świadomej ingerencji twórczej.



RYS. 3. Jedna z prac autorstwa Gabrieli Andrulewicz wykonana na blejtramie

ŹRÓDŁO: oprac. własne.

Literatura

- [1] Fus S., *Sztuka fotografii jako płaszczyzna zrównoważonej kultury wizualnej*, „Eunomia 1” 2024, nr 1, s. 33–38.
- [2] https://www.foma.cz/en/catalogue_bw_photo_materials_and_developing_information [dostęp: 30.05.2025].

Key words: photography, interdisciplinarity, photosensitive emulsion, darkroom

Spis tabel

Wykorzystanie wirtualnych miast w wodociągach

Tabela 1. Wirtualne miasta w zestawieniu.....	13
---	----

Identyfikacja termomechaniczna i strukturalna biokompozytu na bazie PLA w efekcie starzenia abiotycznego

Tabela 1. Wyniki gęstości normalnej dla poszczególnych próbek.....	47
Tabela 2. Wyniki siły zerwania dla poszczególnych próbek mierzonych w danych warunkach.....	48
Tabela 3. Wyniki wydłużenia przy zerwaniu dla poszczególnych próbek przy danych warunkach.....	48

Wpływ wysokości warstwy na jakość druku 3D dla wybranych materiałów konstrukcyjnych

Tabela 1. Parametry drukarek DOUBLE P255-3DGence i Creality Ender 3.....	57
Tabela 2. Naprężenia średnie wraz z wartością odchylenia standardowego próbek z materiału PLA i ABS podawane w MPa wykonanych na drukarkach Ender 3 oraz 3D Gence	62
Tabela 3. Moduły Younga próbek wraz z wartością odchylenia standardowego z PLA i ABS podawane w MPa, wykonane na drukarkach Ender 3 i 3D Gence.....	63
Tabela 4. Obrazy 2D i 3D struktury powierzchni czołowej próbki dla danych grubości warstwy	66
Tabela 5. Obraz 3D struktury powierzchni próbki dla danych grubości warstwy	67
Tabela 6. Wartości chropowatości powierzchni czołowej próbek o podanych grubościach warstwy	68

Badanie charakterystyk segmentów i pakietu baterii opartych na technologii ogniw litowo-jonowych

Tabela 1. Wyniki pomiarów przy ładowaniu elementów badanych.....	84
Tabela 2. Wyniki pomiarów przy rozładowywaniu elementów badanych.....	85

Badanie okulograficzne emocji związanych ze studenckimi wizualizacjami architektonicznymi

Tabela 1. Średni, minimalny i maksymalny czas spędzony przez uczestnika badania na analizie wizualizacji [w sekundach]	108
---	-----

Świadomość wykorzystywania sztucznej inteligencji w procesie uczenia się studentów Politechniki Lubelskiej

Tabela 1. Charakterystyka respondentów.....	124
---	-----

Zastosowanie metod uczenia maszynowego w diagnozowaniu psychiatrycznym

Tabela 1. Końcowe metryki na zbiorze testowym modeli uczenia maszynowego.....	136
---	-----

Fotografia interdyscyplinarna

Tabela 1. Zależności pomiędzy poszczególnymi rodzajami wywoływaczy o różnych stężeniach a materiałami światłoczułymi różnej czułości.....	142
---	-----

Tabela 2. Zależności pomiędzy czasem a temperaturą roztworu.....	143
--	-----

Spis rysunków

Wykorzystanie wirtualnych miast w wodociągach

Rys. 1. Podział sieci wodociągowej na strefy zasilania w wirtualnym mieście Ideal City	8
Rys. 2. Zagospodarowanie Micropolis (kolor jasnozielony – zabudowa mieszkaniowa, różowy – usługowa, szary – przemysłowa)	10
Rys. 3. Wirtualne miasto Mesopolis	11
Rys. 4. Struktura geometryczna sieci dystrybucji wody C-Town	12

Innowacyjne wykorzystanie kory wierzby oraz dębu wzbogaconych grafenem do usuwania jonów metali ciężkich z roztworów wodnych

Rys. 1. Stopień adsorpcji jonów Cu^{2+} do kory dębu i kory dębu z dodatkiem grafenu	19
Rys. 2 Stopień adsorpcji jonów Cu^{2+} do kory dębowej i kory wierzbowej z dodatkiem grafenu	20
Rys. 3. Stopień adsorpcji jonów Pb^{2+} do kory dębowej i kory dębowej z dodatkiem grafenu	20
Rys. 4. Stopień adsorpcji jonów Pb^{2+} do kory dębowej i kory wierzbowej z dodatkiem grafenu	21
Rys. 5. Stopień adsorpcji jonów Zn^{2+} do kory dębowej i kory dębowej z dodatkiem grafenu	22
Rys. 6. Stopień adsorpcji jonów Zn^{2+} do kory dębowej i kory wierzbowej z dodatkiem grafenu	22
Rys. 7. Całkowita zawartość związków fenolowych wyrażona w miligramach kwasu galusowego na gram suchej masy	23

Budowa platformy jeżdżącej z aktywnym zawieszeniem na kołach mecanum

Rys. 1. Ruch przy użyciu kół mecanum	28
Rys. 2. Model pojedynczego koła	30

Wpływ wysokości warstwy na jakość druku 3D dla wybranych materiałów konstrukcyjnych

Rys. 1. Wymiary próbki względem normy PN-EN ISO 527-1:2012	58
Rys. 2. Wymiary próbki do badań wybranych parametrów chropowatości powierzchni	59
Rys. 3. G-code w programie Ultimaker Cura 5.2.1 próbki do badań wytrzymałościowych ...	59

Przegląd badań i innowacji zastosowanych w autonomicznych robotach mobilnych klasy Sumo

Rys. 1. Widok robota MegaSumo w programie SolidWorks	88
--	----

*Wykorzystanie sprzętu medycznego oraz technologii immersyjnych
do badań przestrzeni zbudowanej*

Rys. 1. Idea integracji teorii medycznych..... 98

Zastosowanie metod uczenia maszynowego w diagnozowaniu psychiatrycznym

Rys. 1. Korelacja tetrachoryczna między zmiennymi 132

Rys. 2. Macierz pomyłek dla drzewa decyzyjnego dostrojonego metodą losowego
przeszukiwania parametrów 135

Rys. 3. Ważność predyktorów w drzewie decyzyjnym dostrojonym metodą losowego
przeszukiwania parametrów 135

Rys. 4. Interfejs aplikacji do predykcji wystąpienia chorób psychicznych 137

Fotografia interdyscyplinarna

Rys. 1. Schemat przygotowania zdjęć do wywołania, fot. Karol Kłusewicz 141

Rys. 2. Jedna z prac autorstwa Klaudii Kojro wykonana na papierze strukturalnym..... 145

Rys. 3. Jedna z prac autorstwa Gabrieli Andrulewicz wykonana na blejtramie 146

Spis wykresów

Identyfikacja termomechaniczna i strukturalna biokompozytu na bazie PLA w efekcie starzenia abiotycznego

Wykres 1. DSC/TG dla próbki wykonanej z polipropylenu.....	50
Wykres 2. DSC/TG dla próbki wykonanej z biokompozytu, oznaczonej 1480TEX	51
Wykres 3. DSC/TG dla próbki wykonanej z biokompozytu, oznaczonej 1550TEX	51
Wykres 4. DSC/TG dla próbki wykonanej z biokompozytu, oznaczonej 1850TEX	52

Wpływ wysokości warstwy na jakość druku 3D dla wybranych materiałów konstrukcyjnych

Wykres 1. Krzywe naprężeń próbek z materiału PLA wykonanych na drukarce Ender 3.....	60
Wykres 2. Krzywe naprężeń próbek z materiału PLA wykonanych na drukarce 3D Gence.....	61
Wykres 3. Krzywe naprężeń próbek z materiału ABS wykonanych na drukarce 3D Gence.....	61
Wykres 4. Wartości średnie maksymalnych naprężeń próbek wykonanych z materiału PLA.....	62
Wykres 5. Wartości średnie maksymalnych naprężeń próbek z materiału PLA (niebieski wykres) i ABS (pomarańczowy wykres) wykonanych na drukarce 3D Gence w zależności od grubości warstwy	63
Wykres 6. Wartości średnie modułów Younga próbek z materiału PLA wykonanych na drukarkach: a) Ender 3 (niebieski wykres) b) 3D Gence (pomarańczowy wykres) w zależności od grubości warstwy	64
Wykres 7. Wartości średnie modułów Younga próbek z materiału PLA (niebieski wykres), oraz ABS (pomarańczowy wykres) wykonanych na drukarce 3D Gence w zależności od grubości warstwy	64
Wykres 8. Wpływ grubości warstwy druku na parametr chropowatość powierzchni.....	68

Badanie charakterystyk segmentów i pakietu baterii opartych na technologii ogniw litowo-jonowych

Wykres 1. Charakterystyka napięciowa ładowania segmentu typu I.....	77
Wykres 2. Charakterystyka temperaturowa ładowania segmentu typu I.....	78
Wykres 3. Charakterystyka napięciowa rozładowania segmentu typu I.....	79
Wykres 4. Charakterystyka temperaturowa rozładowania segmentu typu I.....	79
Wykres 5. Charakterystyka napięciowa ładowania segmentu typu II	80
Wykres 6. Charakterystyka temperaturowa ładowania segmentu typu II.....	80

Wykres 7. Charakterystyka napięciowa rozładowania segmentu typu II	81
Wykres 8. Charakterystyka temperaturowa rozładowania segmentu typu II	82
Wykres 9. Charakterystyka napięciowa ładowania pełnego pakietu	82
Wykres 10. Charakterystyka temperaturowa ładowania pełnego pakietu	83
Wykres 11. Charakterystyka napięciowa rozładowania pełnego pakietu	83
Wykres 12. Charakterystyka temperaturowa rozładowania pełnego pakietu	84

Wpływ technologii na bezpieczeństwo informacyjne w Polsce

Wykres 1. Zgłoszone incydenty.....	116
Wykres 2. Kategorie incydentów.....	116
Wykres 3. Liczba cyberprzestępstw w Polsce w latach 2019–2023	117

Świadomość wykorzystywania sztucznej inteligencji w procesie uczenia się studentów Politechniki Lubelskiej

Wykres 1. Narzędzia sztucznej inteligencji wykorzystywane przez studentów PL.....	125
Wykres 2. Cele wykorzystywania AI wskazane przez studentów PL.....	125
Wykres 3. Zalety wykorzystywania narzędzi AI wskazane przez studentów PL.....	126
Wykres 4. Czas zaoszczędzony przez studentów PL dzięki wykorzystaniu narzędzi AI w procesie uczenia się	126
Wykres 5. Wady narzędzi AI dostrzegane przez studentów PL.....	127

Spis fotografii

Budowa platformy jeżdżącej z aktywnym zawieszeniem na kołach mecanum

Fot. 1. Konstrukcja robota typu Task Hunters	27
Fot. 2. Pasek przenoszący moment obrotowy	29
Fot. 3. Raspberry Pi 3.....	31
Fot. 4. Sterownik silników BLDC ODrive	32
Fot. 5. Robot typu Task Hunters	34

Zwiększenie funkcjonalności robota współpracującego z wykorzystaniem metod wizyjnych i metod sterowania głosowego

Fot. 1. Stanowisko zrobotyzowane: a) widok całościowy, b) zbliżenie na system wizyjny. Na widoku całościowym wyszczególniono: system wizyjny (A), system sterowania robota (B) i podświetlany stół roboczy (C) ...	37
Fot. 2. Wykrycie obiektów przez system wizyjny	38
Fot. 3. Robot umieszczający chwytak bezpośrednio nad środkiem jednego z wykrytych obiektów	39
Fot. 4. System sterowania głosem: a) widok ekranu w urządzeniu mobilnym, b) translacja komend głosowych na tekst, c) wydruki serwera informujące o otrzymaniu i wstawieniu do kolejki kolejnych komend głosowych	39

Identyfikacja termomechaniczna i strukturalna biokompozytu na bazie PLA w efekcie starzenia abiotycznego

Fot. 1. Stanowisko do badań mechanicznych bez zamontowanej komory temperaturowej oraz z komorą temperaturową.....	44
Fot. 2. Stanowisko do badań struktury mikroskopowej	44
Fot. 3. Stanowisko do badań termomechanicznych DSC/TG	45
Fot. 4. Komora starzeniowa z umieszczonymi w środku próbkami	46
Fot. 5. Stanowisko do badań gęstości normalnej metodą piknometryczną.....	47
Fot. 6. Morfologia przełomów próbek po badaniach mechanicznych w temperaturze 23°C: a) 1480TEX z podziałką 0,5 mm, b) 1550TEX z podziałką 0,5 mm, c) 1850TEX z podziałką 0,6 mm, d) PP z podziałką 0,25 mm	49
Fot. 7. Morfologia przełomów próbek po badaniach mechanicznych w podwyższonej temperaturze 55°C: a) 1480TEX z podziałką 0,5 mm, b) 1550TEX z podziałką 0,6 mm, c) 1850TEX z podziałką 0,6 mm, d) PP z podziałką 0,5 mm	49

Fot. 8 Morfologia przełomów próbek po badaniach mechanicznych po trzech tygodniach starzenia dla próbek: a) 1480TEX z podziałką 50 μm , b) 1550TEX z podziałką 100 μm , c) 1850TEX z podziałką 200 μm , d) PP z podziałką 50 μm	49
Fot. 9. Morfologia przełomów próbek po badaniach mechanicznych po dziewięciu tygodniach starzenia dla próbek: a) 1480TEX z podziałką 200 μm , b) 1550TEX z podziałką 200 μm , c) 1850TEX z podziałką 200 μm , d) PP z podziałką 200 μm	50

Wpływ wysokości warstwy na jakość druku 3D dla wybranych materiałów konstrukcyjnych

Fot. 1. Próbką zamocowana w szczękach maszyny	58
Fot. 2. Próbkę po statycznej próbie na rozciąganie	60
Fot. 3. Próbkę do badań chropowatości powierzchni: a) bocznej, b) czołowej.....	65

Badanie charakterystyk segmentów i pakietu baterii opartych na technologii ogniw litowo-jonowych

Fot. 1. Pomiar pojedynczego ogniwa.....	72
Fot. 2. Segment typu II w trakcie zgrzewania	73
Fot. 3. Segment typu I po zgrzaniu	74
Fot. 4. System „DIY BMS” spięty w konfiguracji dla segmentu typu I.....	74
Fot. 5. Segment typu II po zgrzaniu większości ogniw	75
Fot. 6. Pełen pakiet baterii zamontowany w obudowie.....	76
Fot. 7. Zasilacz dwukierunkowy ITECH IT6006C-800-25	77
Fot. 8. Rozkład temperatur na układach podrzędnych w trakcie balansowania segmentu typu I	78
Fot. 9. Rozkład temperatur na układach podrzędnych w trakcie balansowania segmentu typu II	81

Przegląd badań i innowacji zastosowanych w autonomicznych robotach mobilnych klasy Sumo

Fot. 1. Kategorie robotów Sumo.....	87
-------------------------------------	----

Wykorzystanie sprzętu medycznego oraz technologii immersyjnych do badań przestrzeni zbudowanej

Fot. 1. Urządzenia medyczne wykorzystane do badań własnych przestrzeni zbudowanej. Sprzęty znajdują się na wyposażeniu Laboratorium Projektowania Uniwersalnego i Inkluzyjnego (LabUI) KUA, WBIŚiA, PRz.....	99
Fot. 2. Urządzenia VR wykorzystywane do badań własnych przestrzeni zbudowanej – Meta Quest 3 wraz z soczewkami korekcyjnymi	100

Badanie okulograficzne emocji związanych ze studentkimi wizualizacjami architektonicznymi

Fot. 1. Kadr z widoku uczestnika badania na wizualizację oraz elementy interaktywne	104
Fot. 2. Tobii Pro Fusion	105
Fot. 3. Przykładowa mapa cieplna wykorzystana w badaniach na wizualizacji.....	107
Fot. 4. Przykładowa ścieżka wzroku, na której widać przewagę pozytywnych emocji ze względu na charakter połączeń.....	107
Fot. 5. Plansza 17.....	108
Fot. 6. Plansza 18.....	108



POLITECHNIKA
LUBELSKA



POLITECHNIKA
RZESZOWSKA
im. IGNACEGO ŁUKASIEWICZA



POLITECHNICZNA SIEĆ
VIA CARPATIA