



POLITECHNIKA
LUBELSKA



POLITECHNIKA
RZESZOWSKA
im. IGNACEGO ŁUKASIEWICZA



POLITECHNICZNA SIEĆ
VIA CARPATIA

TRZECIA KONFERENCJA KÓŁ NAUKOWYCH W RAMACH POLITECHNICZNEJ SIECI VIA CARPATIA

im. Prezydenta RP Lecha Kaczyńskiego

redakcja naukowa:

JAROSŁAW SZUSTA

KATARZYNA KALINOWSKA-WICHROWSKA

MAGDALENA JOKA YILDIZ

JAROSŁAW CZABAN

KAROLINA GABRYSIK



Minister
Edukacji i Nauki

Finansowane ze środków Ministra Edukacji i Nauki
w ramach zadania zleconego pn. „Politechniczna Sieć VIA CARPATIA
im. Prezydenta RP Lecha Kaczyńskiego



Ministerstwo
Edukacji i Nauki

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

redakcja naukowa:

Jarosław Szusta, Katarzyna Kalinowska-Wichrowska,
Magdalena Joka Yildiz,
Jarosław Czaban, Karolina Gabrysiak



Politechnika
Białostocka

OFICyna WYDAWNICZA POLITECHNIKI BIAŁOSTOCKIEJ
BIAŁYSTOK 2024

Recenzenci:

dr inż. Magdalena Apollo, dr Mariusz Citkowski, dr hab. inż. Jacek Czarnigowski, prof. PL,
dr hab. inż. Dariusz Czerwiński, prof. PL, dr inż. Marcin Dębiński, dr inż. Łukasz Dragun,
dr hab. inż. Małgorzata Franus, prof. PL, dr hab. inż. Marcin Gąsior, dr inż. Rafał Grądzki,
dr inż. Marcin Gryniewicz, dr hab. inż. Mariusz Holuk, dr hab. Agata Jabłńska-Trypuć,
dr Joanna Jończyk, dr inż. Rafał Kopacz, dr hab. Bartosz Kozicki, prof. WAT,
dr hab. Rafał Krętowski, dr Justyna Kujawska, dr hab. inż. Konstanty Miatluk,
dr inż. Marek Motylewicz, dr hab. inż. Ireneusz Mrozek, dr hab. inż. Dorota Papciak,
prof. PRz, dr hab. inż. Agnieszka Pregowska, dr inż. Wojciech Trzasko, dr Marta Wiącek,
dr inż. Paweł Wojewoda, prof. dr hab. inż. Wojciech Wolański, dr Jacek Woźniak

Korekta językowa:

Edyta Chrzanowska

Skład, grafika i okładka:

Marcin Dominów

© Copyright by Politechnika Białostocka, Białystok 2024

ISBN 978-83-68077-41-4 (e-Book)

DOI: 10.24427/978-83-68077-41-4



POLITECHNIKA
LUBELSKA



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.

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

Spis treści

Wstęp	5
System jezdny analogu łoża marsjańskiego <i>Michał Radawiec, Karolina Kiwus, Michał Bazan</i>	7
Analiza porównawcza systemów certyfikacji budynków BREEAM, LEED i WELL <i>Piotr Matysiak, Patrycja Miszczuk, Karolina Falkowska, Michał Tomczak</i>	19
Układ napędowy motocykla elektrycznego zasilanego ogniwami litowo-jonowymi <i>Ernest Przychodzki, Nikodem Zych</i>	33
Najnowsze wyzwania w cyberbezpieczeństwie – analiza rosnących zagrożeń online <i>Wojciech Zajączkowski, Michał Zielonka, Julia Semak</i>	47
Badanie satysfakcji pasażerów metodą CSI – wyniki analiz wśród pokolenia Z <i>Anna Lesiak, Michałina Kołodziej, Przemysław Ruszel</i>	59
Koncepcja rozbudowy dróg rowerowych Velo Wisłok na obrzeżach Rzeszowa <i>Izabela Domin, Justyna Dyrkacz, Mateusz Bajek, Patryk Dąbrowski</i>	71
Algorytm modyfikacji orientacji narzędzia robota przemysłowego w procesie wytwarzania addytywnego <i>Marcin Górski, Antoni Skiba, Valerii Prykhodzenko, Mikołaj Sowa, Jacek Domińczuk, Łukasz Sobaszek</i>	87
Wpływ temperatury na pracę ogniwa słonecznego <i>Aleksandra Gąska, Wiktoria Malinowska, Mikołaj Sieńko, Łukasz Popławski</i>	101
Doskonalenie systemu logistycznego na przykładzie Grupy Aliplast <i>Izabela Bobel, Michał Gruszka, Klaudia Baran, Martyna Majchrzak, Monika Kulisz</i>	117
Analiza naprężenia oraz ciśnienia podczas przemieszczania się leja względem kikuta <i>Julia Jagodyńska, Anita Gryko, Dominika Nowińska, Kacper Snarski, Piotr Prochor, Marcin Dziemianowicz</i>	133

Tajniki smaku. Część 1: Analiza tekstury przekąsek <i>Izabela Borawska, Kinga Koziak, Milena Janusz, Żaneta Hościło, Piotr Tarasewicz, Magdalena Joka Yildiz</i>	145
Tajniki smaku. Część 2: Analiza jakości miódów <i>Mateusz Mackiewicz, Małgorzata Kowczyk-Sadowy, Jolanta Piekut, Magdalena Joka Yildiz</i>	161
Ocena potencjału terapeutycznego koniugatów glicydylowanych dendrymerów PAMAM generacji czwartej z lapatynibem, fulwestrantem i/lub paklitakselem w chorobach nowotworowych i pasożytniczych <i>Magdalena Twardowska, Żaneta Szymaszek, Justyna Noga, Artur Kołodziej, Łukasz Uram</i>	171
Badanie użyteczności Cyfrowej Platformy Zdrowia Młodzieży <i>Szymon Wiśniewski, Urszula Konopko, Nikodem Szwed, Eryk Śliwowski, Michał Lipka, Krzysztof Konopko</i>	185
Spis tabel	197
Spis rysunków	199
Spis fotografii	205

Wstęp

Niniejsza monografia stanowi efekt III Konferencji Kół Naukowych w ramach Politechnicznej Sieci Via Carpatia im. Prezydenta RP Lecha Kaczyńskiego, zorganizowanej przy wsparciu Ministerstwa Edukacji i Nauki na Politechnice Białostockiej. Projekt ten, skupiający trzy uczelnie techniczne wschodniej Polski: Politechnikę Białostocką, Politechnikę Lubelską oraz Politechnikę Rzeszowską, został stworzony z myślą o promocji nauki oraz wzmacnianiu współpracy między nimi.

Celem konferencji było nie tylko rozwinięcie obszarów naukowych związanych z Regionami Polski Wschodniej, lecz także poszerzenie wiedzy w zakresie kształcenia, nauki i komercjalizacji. Istotnym elementem tego przedsięwzięcia było również umożliwienie studentom z wymienionych uczelni publikacji artykułów naukowych oraz prezentacji ich wyników badań, co miało sprzyjać wymianie doświadczeń i integracji młodych adeptów nauki.

Monografia zawiera artykuły przygotowane przez członków kół naukowych uczestniczących w konferencji, reprezentujących różnorodne dziedziny techniczne. Poprzez tę publikację studenci nie tylko dzielą się swoimi osiągnięciami, lecz także przyczyniają się do rozwoju nauki oraz współpracy między uczelniami, co wpisuje się w szerszy kontekst rozwoju wschodniej Polski.

Zapraszamy do lektury tej monografii, która stanowi zbiór najnowszych osiągnięć studentów z obszarów technicznych, będących nieodłączną częścią tej dynamicznej sieci naukowej.

System jezdny analogu łożnika marsjańskiego

Michał Radawiec, Karolina Kiwus, Michał Bazan

*Politechnika Rzeszowska, Koło Naukowe Lotników
radawiec.legendary@gmail.com*

Summary: This article focuses on the driving system that is the analogue of the Mars rover being built to compete in the Rover Challenge series. It discusses both the mechanical and electronic components of this system, which are key components that affect the performance, stability and functionality of the vehicle in challenging off-road conditions.

Key words: rover, autonomy, suspension, robotics

1. Wstęp

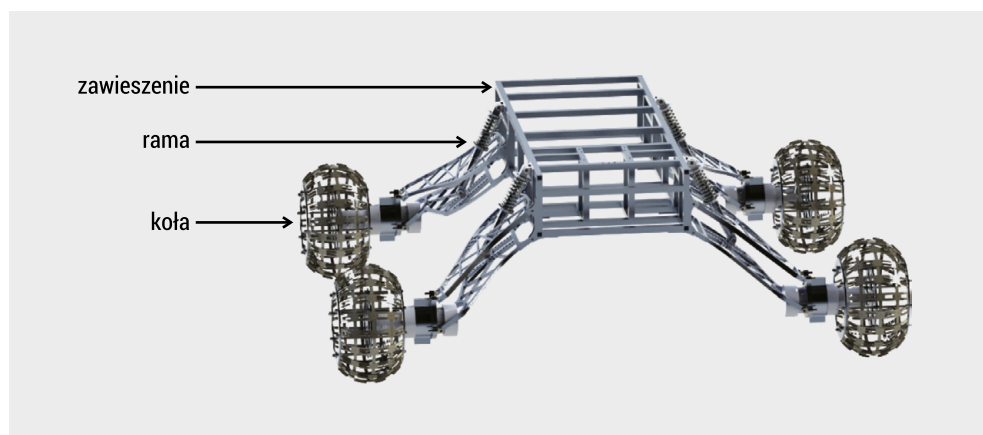
Rozwój systemów jezdnych ma decydujące znaczenie dla przyszłości robotów eksploracyjnych oraz pojazdów autonomicznych, szczególnie tych zaprojektowanych do badania i eksploracji planet. Zarówno w historii łożników marsjańskich, jak i ich analogów powstało już wiele rodzajów systemów jezdnych. Jednym z popularniejszych jest Rocker Bogie Mechanism [1], który wykorzystany został w najbardziej znanych pojazdach, takich jak łożnik Perseverance czy Opportunity. Zaawansowane rozwiązania w zakresie systemów jezdnych nie tylko poszerzają granice możliwości robotów eksploracyjnych, lecz także stanowią kluczowy punkt w ewolucji pojazdów autonomicznych. Konstrukcja, którą analizujemy, odgrywa istotną rolę jako analogiczny system jezdny łożnika marsjańskiego, umożliwiając precyzyjne poruszanie się w trudnym i zmieniającym się środowisku. System ten jest autorskim zawieszeniem bazującym na pojazdach terenowych typu buggy, rozwijanym w każdej kolejnej generacji budowanego przez analogu łożnika. Taka konstrukcja umożliwia duże ograniczenie wagi, co w przypadku wysyłania pojazdu w kosmos jest niezwykle ważnym aspektem. Dodatkowo zastosowanie czterech kół zamiast sześciu, które względem popularnego w tego typu konstrukcjach zawieszenia Rocker Bogie Mechanism stwarza mniej

skomplikowany układ, umożliwia prostą i szybką wymianę każdego elementu zawieszenia. W dalszej części artykułu szczegółowo przedstawiony zostanie każdy aspekt naszego systemu, zarówno od strony mechanicznej, jak i elektronicznej.

2. Część mechaniczna

Konstrukcja mechaniczna łazika marsjańskiego stworzonego przez zespół Studenckiego Koła Naukowego Lotników składa się z trzech podzespołów (rys. 1):

- ramy,
- kół,
- zawieszenia.



RYS. 1. Konstrukcja mechaniczna

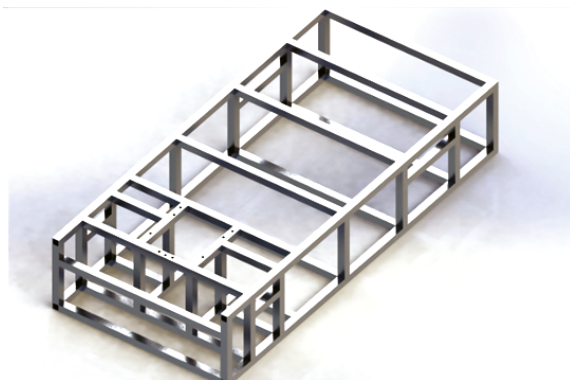
ŹRÓDŁO: opracowanie własne.

Wszystkie elementy w trakcie procesu projektowania zostały przez nas przeanalizowane metodą elementów skończonych w programie Solidworks w celu sprawdzenia wytrzymałości konstrukcji oraz optymalizacji topologicznej.

3. Rama

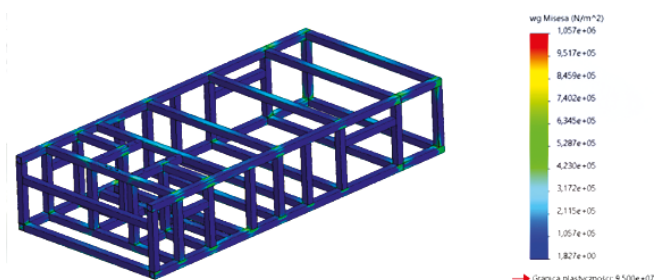
Rama jest fundamentalnym elementem integrującym pozostałe części konstrukcji w spójną całość. W jej wnętrzu mieszczą się elementy elektroniczne odpowiedzialne za zasilanie, sterowanie, komunikację i autonomię systemu. W zewnętrznych obszarach ramy mocowane są supporty, które stanowią punkt montażu dla elementów zawieszenia. Tego rodzaju konstrukcja ramy umożliwia znaczną elastyczność w rozmieszczeniu poszczególnych podsystemów elektroniki, zasilania oraz elementów

zawieszenia (rys. 2). Wykorzystane aluminium nie tylko zapewnia odpowiednią wytrzymałość konstrukcji, lecz także minimalizuje jej wagę do zaledwie 2,5 kilograma. To niezmiernie istotne, ponieważ redukcja masy ramy wpływa korzystnie na ogólną wydajność i manewrowość pojazdu, ponadto stanowi to niewątpliwy atut w kontekście zawodów, na których wymagana jest niska waga pojazdu (rys. 3).



RYS. 2. Konstrukcja ramy

ŹRÓDŁO: opracowanie własne.



RYS. 3. Analiza elementów skończonych konstrukcji ramy

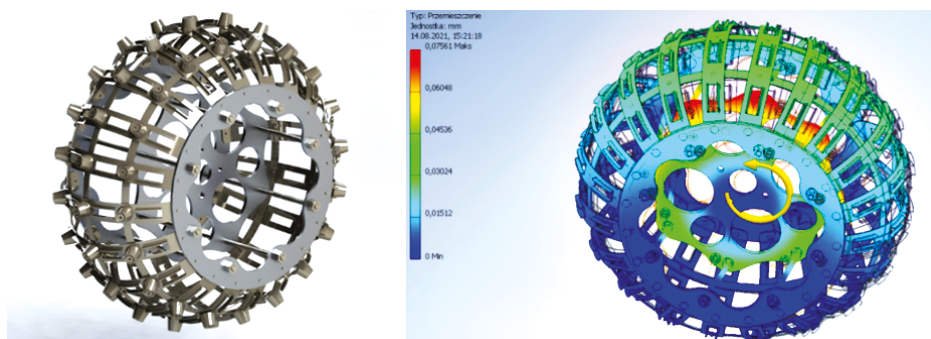
ŹRÓDŁO: opracowanie własne.

4. Koła

Odpowiednie zaprojektowanie oraz optymalizacja konstrukcji kół w pojazdach odgrywają kluczową rolę w zapewnieniu niezawodności i wytrzymałości. Jest to istotne ze względu na ekstremalne warunki panujące na Marsie, do pracy w których łazik jest projektowany. Niezawodność i wytrzymałość są testowane w trakcie corocznych zawodów, np. University Rover Challenge odbywających się na pustyni w Utah w Stanach Zjednoczonych, która w największym stopniu imituje warunki panujące na Marsie.

Historia łożników przemierzających Czerwoną Planetę pokazała, że kwestia wytrzymałości kół jest kluczowa dla funkcjonalności i efektywności pojazdów terenowych. Dla porównania, wykonane przez nas wcześniej modele kół, wyprodukowane z wykorzystaniem technologii druku 3D, były podatne na uszkodzenia w wyniku długotrwałego oddziaływania znacznego ciepła oraz intensywnego ścierania się o ostre krawędzie kamieni. Te doświadczenia zmusiły nas do poszukiwania bardziej niezawodnych rozwiązań.

Aktualnie stosowane przez nas koła zostały całkowicie przeprojektowane, opierają się wyłącznie na solidnych i wytrzymałych metalach, takich jak duraluminium i stal sprężynowa. Wybór tych materiałów zapewnia imponującą odporność na warunki atmosferyczne, które panują podczas trudnych etapów zawodów, minimalizując ryzyko uszkodzeń i zapewniając stabilność podczas ekstremalnych obciążeń (rys. 4).



RYS. 4. Analiza elementów skończonych kół

ŹRÓDŁO: opracowanie własne.

Warto również podkreślić, że nasza konstrukcja kół została starannie zaplanowana, tak aby umożliwiać montaż specjalnych kołców. Ta innowacyjna funkcjonalność pozwala naszemu pojazdowi poruszać się znacznie sprawniej po terenach o trudnych warunkach, szczególnie na obszarach piaszczystych czy nierównych, zapewniając większą przyczepność i kontrolę nad manewrowaniem. To ważne udogodnienie, które może znacząco poprawić wydajność i efektywność podczas ekstremalnych zadań eksploracyjnych.

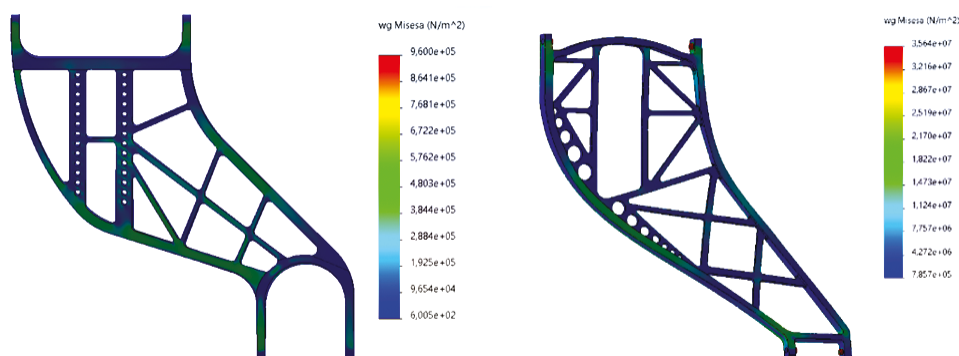
5. Zawieszenie

Zastosowane przez nas zawieszenie jest wyraźnie inspirowane technologią stosowaną w motoryzacji, szczególnie w konstrukcjach przeznaczonych do pokonywania trudnych piaszczystych terenów, takich jak typowe buggy terenowe. Nasz system

zawieszenia składa się z kilku kluczowych elementów, które harmonijnie współpracują, zapewniając wyjątkową elastyczność i wytrzymałość w różnych warunkach terenowych.

Podstawowymi elementami naszego systemu zawieszenia są supporty, wahacze, amortyzatory, obejmy silników, śruby oczkowe oraz sworznie. Konstrukcja wahacza została szczególnie zaprojektowana z myślą o możliwości dostosowania kąta położenia amortyzatorów. To umożliwia łatwe i szybkie dostosowanie zawieszenia do warunków terenowych, w jakich porusza się pojazd. Jednak kluczową praktyką, która znacząco wpływa na wydajność systemu, jest dobór odpowiednich sprężyn do konkretnego terenu, na którym ma działać łaźik.

Dzięki możliwości modyfikacji kąta amortyzatorów oraz doborowi właściwych sprężyn zgodnie z warunkami terenowymi nasz pojazd ma szansę zapewnić optymalną stabilność, przyczepność i wygodę jazdy (rys. 5). To nie tylko podnosi efektywność poruszania się po różnorodnych terenach, lecz także minimalizuje ryzyko uszkodzeń oraz zapewnia większą kontrolę nad pojazdem w ekstremalnych warunkach. Ostatecznie elastyczność i modyfikowalność naszego systemu zawieszenia są kluczowe dla osiągnięcia wysokiej wydajności i trwałości pojazdu podczas eksploracji. Górny wahacz stanowi tylko i wyłącznie funkcję stabilizacyjną, natomiast dolny jest odpowiedzialny za przenoszenie wszystkich obciążeń, dlatego też jest on grubszy od górnego o 30%.



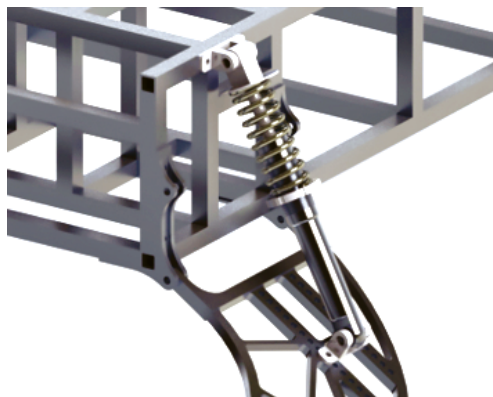
RYS. 5. Analiza metodą elementów skończonych wahaczy

ŹRÓDŁO: opracowanie własne.

Amortyzatory stanowią istotny element w każdym z kół (rys. 6), które wyposażone są w oddzielne systemy wahaczy i amortyzacji. Składają się one z kluczowych komponentów, które odpowiadają za ich funkcjonalność:

- sprężyna – odgrywa rolę głównego elementu składowego amortyzatora, zapewniając absorpcję wstrząsów i równowagę nierówności terenu;
- poliuretanowy tłok wewnętrzny – jest integralną częścią amortyzatora, wspomaga proces absorpcji drgań i zapewnia lepsze osiągi podczas trudnych warunków terenowych.

Zgodnie z regulaminem uczestnictwa w zawodach stanowiących pole rywalizacji zespołu amortyzator został zaprojektowany bez użycia oleju, który tradycyjnie pełni funkcję tłumiącą. Dzięki tej konstrukcji amortyzatora istnieje możliwość jego regulacji, m.in. poprzez precyzyjne dostosowanie stopnia ściśnięcia sprężyny, co umożliwia dostosowanie pracy amortyzatora do zmiennych warunków terenowych i wymagań konkurencji.



RYS. 6. Model czynnego elementu zawieszenia

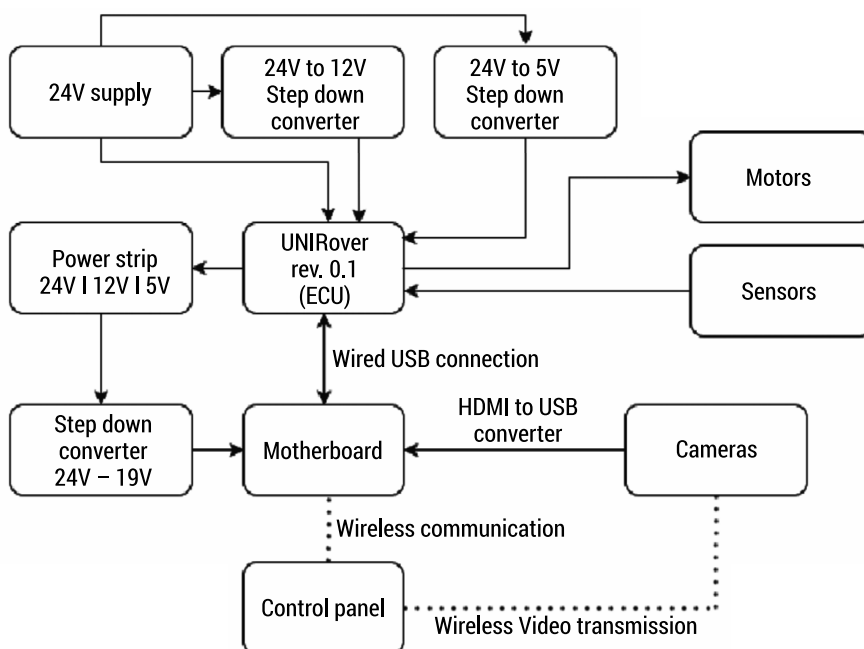
ŹRÓDŁO: opracowanie własne.

6. Część elektroniczna

W trakcie prac nad projektem łazika sekcja elektroników skupiała się głównie na pracach inżynierskich, ponieważ elektronika poprzedniej generacji uległa nieodwracalnym uszkodzeniom z przyczyn losowych i nie zachowała się żadna dokumentacja. Pojawiła się więc potrzeba zaprojektowania oraz implementacji zupełnie nowego systemu, który umożliwiałby kontrolowanie zachowania pojazdu z poziomu stacji operatorskiej. Brak więc tu aspektu badawczego, ale zaistniała sytuacja okazała się idealną okazją dla studentów do przekucia zdobytej na politechnice wiedzy w praktykę.

Na rys. 7 przedstawiony został projekt systemu elektronicznego. Składa się on z następujących bloków:

- zasilanie – cały system zasilany jest bateryjnie i wykorzystuje zasilacz komputerowy do przetwarzania napięcia,
- funkcje niskopoziomowe – realizowane przez płytkę UNIRover ECU rev0.1. (fot. 1),
- komunikacja ze stacją operatorską – wykorzystanie transceiverów radiowych do wymiany komunikatów,
- wizja – osobny system radiowy, który przesyła wizję do stacji operatorskiej.



RYS. 7. Schemat blokowy systemu jeźdnego łazika

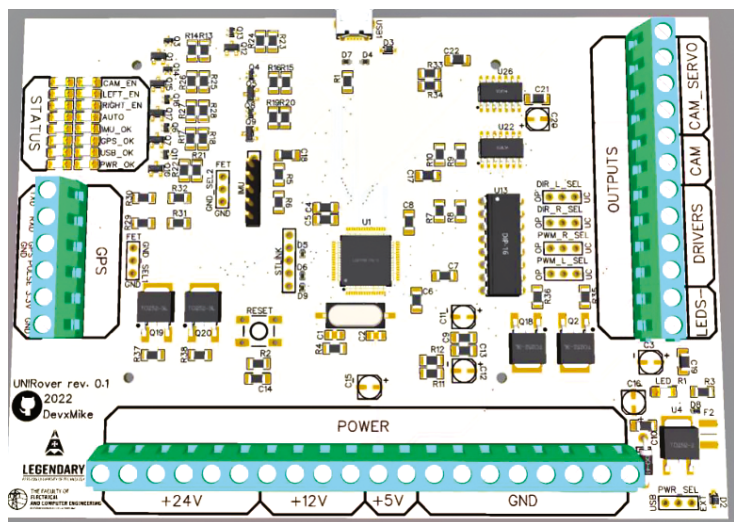
ŹRÓDŁO: opracowanie własne.

Na fot. 1 ukazana została płytką UNIRover ECU rev0.1 [4], która w całości została zaprojektowana oraz zaimplementowana przez studentów pracujących w SKNL. Powstała ona w celu pokrycia realizacji funkcji niskopoziomowych, takich jak:

- sterowanie prędkością obrotową silników,
- realizacja prostej odometrii,
- obsługa sensora IMU,
- obsługa sensora GPS,
- sterowanie sygnalizatorem LED wskazującym tryb pracy urządzenia.

Implementacja elektroniczna wprowadza następujące możliwości:

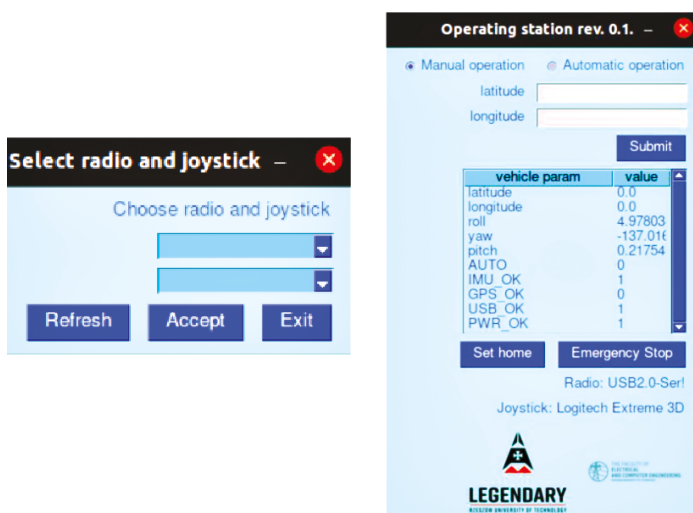
- sprzętowy reset czujników IMU oraz GPS poprzez wykorzystanie tranzystora MOSFET do „załączania” masy sensora,
- sekcja „STATUS” składa się z diod wskazujących główne stany systemu, które umożliwiają diagnostykę bez zagłębiania się w szczegóły implementacji elektroniki czy oprogramowania,
- płytką udostępnia interfejs USB, który umożliwia łatwe połączenie z komputerem.



FOT. 1. Wizualizacja płytki UNIRover ECU

ŹRÓDŁO: opracowanie własne.

Komputer pokładowy Raspberry PI pełnił funkcję mostu komunikacyjnego oraz obsługi sensora LIDAR, a ze względu na ograniczone możliwości obliczeniowe blok nawigacyjny przeniesiono na stację operatorską. Panel operatorski zaimplementowany w języku programowania Python (fot. 2) składał się z obsługi interfejsu graficznego, komunikacji radiowej i kontrolera, umożliwiając użytkownikowi monitorowanie i sterowanie pojazdem [2].



FOT. 2. Panel operatorski

ŹRÓDŁO: opracowanie własne.

Ekran startowy (fot. 2) prosi użytkownika o wybranie urządzeń:

- joysticka do sterowania pojazdem,
- transceivera radiowego wykorzystywanego do komunikacji z pojazdem.

Po wybraniu urządzeń aplikacja przechodzi do widoku głównego, w którym można odczytać pozycję i orientację robota oraz stany płytki UNIRover ECU. Możliwe akcje operatorskie:

- bezpośrednie sterowanie pojazdem za pośrednictwem kontrolera,
- ustawienie pozycji HOME, do której pojazd powinien wrócić po wciśnięciu przycisku emergency stop,
- ustawienie automatycznego przejazdu do wprowadzonych współrzędnych.

Obsługa kontrolera została zaimplementowana poprzez wykorzystanie systemu rozmytego [3], który dokonuje przepamiętania odczytu osi kontrolera na prędkości silników.

Zadanie nawigacji również realizował system rozmyty, który korzystał z odczytów z sensorów dostarczonych przez komputer pokładowy.

Na potrzeby projektu zaimplementowany został prosty protokół komunikacyjny (tab. 1), którym posługują się wszystkie komponenty systemu. Pozwala on na elastyczne przesyłanie danych oraz dostarczanie dodatkowego kontekstu. Warto również wspomnieć o tym, że w tym konkretnym zastosowaniu, wprowadzono komunikat HANDSHAKE, który przesyłają między sobą urządzenia, aby upewnić się, że istnieje pomiędzy nimi połączenie kablowe lub radiowe. Jeśli komputer pokładowy nie otrzyma odpowiedzi w ciągu zdefiniowanego czasu, natychmiast zatrzymuje robota.

TABELA 1. Protokół komunikacyjny

START BYTE 0x69	TYPE 0 – 255	PAYLOAD LENGTH 0 – 255	CRC 0 – 255	DATA	PAYLOAD [0 – 255]
TYPE	SENDER	RECEIVER	ACTION		PARAMS
0	ALL	ALL	CONNECTION HANDSHAKE		NONE
1	M	ECU	SET MOTORS		MOTOR DRIVE
2	ALL	ALL	PREPARE, SEND, RECEIVE DIAG		NONE/DIAG
3	ECU, M	M, OS	IMU DATA		SENSOR READINGS
4	ECU, M	M, OS	GPS DATA		SENSOR READINGS
5	M	ECU	SET LED INDICATOR		MODE
7	ALL	ALL	PREPARE, SEND, RECEIVE DIAG		NONE/DIAG
8	M, OS	ECU	SENSOR DATA		NONE
100	OS	M	AUTO DRIVE		DESIRED GPS COORDS
101	OS	M	MANUAL DRIVE		JOYSTICK READINGS

OS – Operating station, M – Motherboard, ECU – UNIRover

ŹRÓDŁO: opracowanie własne.

Protokół składa się z następujących pól:

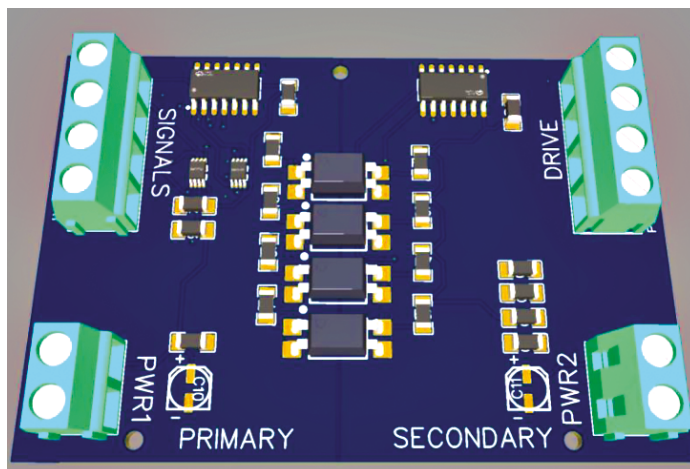
- start – identyfikacja początku pakietu,
- typ – polecenie, jakie niesie ze sobą pakiet,
- ilość danych – informacja o ilości długości pakietu,
- suma kontrolna – suma obliczana na podstawie pól pakietu za pośrednictwem wzoru (1),
- dane – dodatkowe informacje zawarte w pakiecie.

$$CRC = ((\sum_{i=0}^{len-1} payload[i]) + len) \bmod 256 \quad (1)$$

Tego typu konstrukcja wprowadza następujące usprawnienia:

- możliwość sprawdzenia poprawności danych,
- możliwość przesyłu danych z dowolnego zakresu, nie jest wymagane ASCII,
- brak konieczności stosowania znaku stopu.

W trakcie prac nad projektem nie obyło się również bez problemów. Sterowniki do silników, które były wykorzystywane w początkowej fazie, okazały się bardzo podatne na awarie, dlatego trzeba było je wymienić. Aby móc jednak zastosować sterowniki nowego typu, należało zaprojektować płytkę konwertującą logikę sterowania (fot. 3), ponieważ wyjścia z ECU nie były z nimi kompatybilne. Usprawnieniem, jakie wdrożono przy tej modyfikacji, była izolacja optyczna sygnałów sterujących oraz samych sterowników, co ograniczyło ryzyko uszkodzenia płytki sterującej.



FOT. 3. Wizualizacja płytki konwertującej sygnały sterujące

ŹRÓDŁO: opracowanie własne.

7. Podsumowanie

W artykule skupiono się na analizie i rozwoju systemu jezdnego, który jest analogiem dla konstrukcji łazika marsjańskiego zaprojektowanego do udziału w zawodach Rover Challenge. Omówione zostały zarówno elementy mechaniczne, jak i elektroniczne tego systemu. Skoncentrowano się na ich roli w poprawie wydajności, stabilności i funkcjonalności pojazdu w trudnych warunkach terenowych.

W części mechanicznej opisano kluczowe elementy, takie jak rama, koła i zawieszenie. Konstrukcja wykonanej z aluminium ramy zapewnia nie tylko wytrzymałość, lecz także minimalizuje wagę pojazdu, co ma istotne znaczenie dla jego ogólnej wydajności i manewrowości. Koła zostały całkowicie przeprojektowane, aby zwiększyć ich niezawodność i odporność na trudne warunki terenowe, co jest kluczowe dla funkcjonalności pojazdu. Zawieszenie zaś, inspirowane technologią motoryzacyjną, zapewnia elastyczność i wytrzymałość w różnych warunkach terenowych.

W części elektronicznej opisany został proces projektowania i implementacji nowego systemu elektronicznego umożliwiającego kontrolę pojazdu z poziomu stacji operatorskiej. System składa się z bloków zasilania, funkcji niskopoziomowych, komunikacji ze stacją operatorską oraz wizji. Zastosowano płytę UNIRover ECU rev0.1, która realizuje funkcje niskopoziomowe pojazdu, oraz panel operatorski umożliwiający monitorowanie i sterowanie pojazdem.

Podkreślono znaczenie nowoczesnych rozwiązań mechanicznych i elektronicznych dla wydajności i funkcjonalności pojazdów eksploracyjnych, szczególnie w trudnych warunkach terenowych. Przedstawione rozwiązania stanowią istotny krok naprzód w rozwoju robotów eksploracyjnych i pojazdów autonomicznych, otwierają też nowe możliwości dla przyszłych misji badawczych na Ziemi i w kosmosie.

Literatura

- [1] Abhishek V., Chandrajeet Y., Bandana S., Arpit G., Jaya M., Abhishek S., *Design of Rocker-Bogie Mechanism*, „International Journal of Innovative Science and Research Technology” 2017, vol. 2(5), s. 312–338.
- [2] Chollet F., *Deep learning with Python*, Manning, Shelter Island 2017.
- [3] Cichosz P., *Systemy uczące się*, WNT, Warszawa 2009.
- [4] Noviello C., *Mastering STM32*, Leanpub, 2022.

Analiza porównawcza systemów certyfikacji budynków BREEAM, LEED i WELL

Piotr Matysiak, Patrycja Miszczuk, Karolina Falkowska, Michał Tomczak

Politechnika Lubelska, Koło Naukowe Technologii Budownictwa „Aedificatio”

piotr.matysiak@pollub.edu.pl

Summary: The idea of sustainability has become one of the most important challenges of the modern world. Its implementation is particularly important in the building sector, which produces between 28 and 40% of total carbon dioxide emissions. One of the practical aspects of implementing the concept of sustainable development in the construction industry is the use of building certification systems. The paper attempts to make a comparative analysis of three popular building certification systems in Poland: BREEAM, LEED and WELL. The results of the analysis indicate the differences between the certification methods considered and also present the areas of convergence of all the systems considered. The results of the analysis may be useful in selecting a building certification system or may serve to broaden knowledge of the building certification systems in use.

Key words: BREEAM, LEED, WELL, sustainability

1. Wstęp

1.1. Rola zrównoważonego rozwoju we współczesnym budownictwie

W obliczu narastających wyzwań związanych ze zmianami klimatycznymi, degradacją środowiska naturalnego oraz coraz większym zapotrzebowaniem na zasoby koncepcja zrównoważonego rozwoju stała się jednym z kluczowych zagadnień współczesnego budownictwa. Jej głównymi filarami są środowisko, społeczeństwo oraz ekonomia, a podstawowym celem jest osiągnięcie równowagi między wymienionymi czynnikami, mając na uwadze troskę o dobro współczesnej oraz przyszłej społeczności.

Najemcy powierzchni biurowej i magazynowej coraz częściej zwracają uwagę nie tylko na cenę, lecz także na jakość wykonania i dostosowanie budynku do najnowszych trendów. Konsekwencją tego jest rosnąca popularność różnych systemów

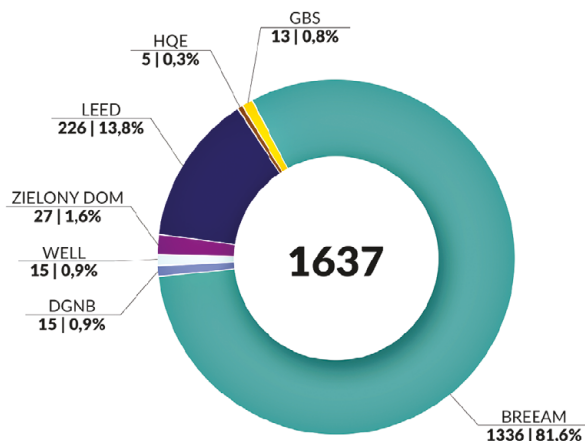
certyfikacji budynków. Na rynku polskim najczęściej występują takie systemy, jak: BREEAM (ang. *Building Research Establishment Environmental Assessment Method*), LEED (ang. *Leadership in Energy and Environmental Design*) oraz WELL Building Standard. Są to metody oceny budynków, które potwierdzają, że dany obiekt został zaprojektowany, wybudowany, a także jest zarządzany zgodnie z zasadami zrównoważonego rozwoju. Uzyskanie certyfikatu w jednym z wymienionych systemów stanowi dodatkową wartość dla nieruchomości i jest pożądane przez inwestorów.

2. Certyfikacja wielokryterialna budynków

2.1. Systemy certyfikacji budynków w Polsce

Podstawowym założeniem certyfikatów wielokryterialnych jest minimalizacja negatywnego wpływu budownictwa na środowisko oraz maksymalizacja korzyści dla użytkowników i społeczności lokalnych. Są one dobrowolnym w stosowaniu, ustandaryzowanym zespołem wskaźników, według których różne budynki jednego typu oceniane są przez niezależną jednostkę certyfikującą. Należy mieć na uwadze, że systemy certyfikacji budynków wymagają działań nie tylko podczas projektowania obiektu, lecz także na dalszych etapach życia budynku.

Według danych za rok 2023 (rys. 2.1) w Polsce znajduje się aż 1637 certyfikowanych budynków. Przeważająca większość, bo aż 81,6% z nich, została oceniona w systemie certyfikacji BREEAM.

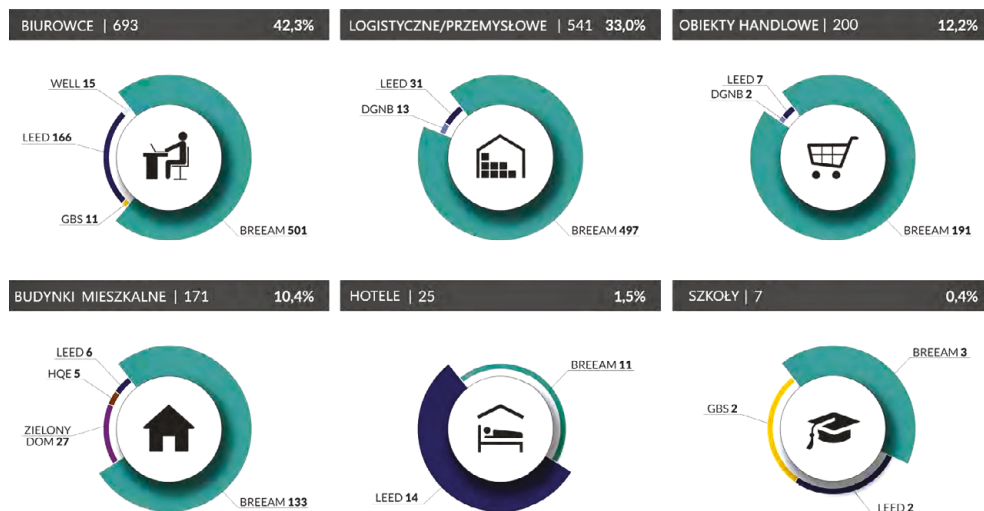


RYS. 2.1. Liczba certyfikowanych budynków w Polsce (stan na marzec 2023 r.)

ŹRÓDŁO: [1].

Drugim najczęściej przyznawanym certyfikatem jest LEED, który otrzymało 226 obiektów, co stanowi 13,6% wśród wszystkich certyfikowanych budynków. Stosunkowo nowym certyfikatem na polskim rynku jest WELL, ponieważ został on przyznany po raz pierwszy w 2018 r. Stopniowo zyskuje jednak popularność wśród inwestorów, do marca 2023 r. uzyskało go 15 budynków [1].

Systemy certyfikacji wielokryterialnej są stosowane przede wszystkim przez inwestorów i właścicieli biurowców, parków logistyczno-przemysłowych oraz obiektów handlowych (rys. 2.2). Uzyskanie przez budynek certyfikatu daje potencjalnym najemcom gwarancję, że został on wybudowany zgodnie z zasadami zrównoważonego rozwoju i poszanowaniem środowiska naturalnego.



RYS. 2.2. Podział branżowy certyfikowanych budynków

ŹRÓDŁO: [1].

2.2. BREEAM

Certyfikat BREEAM od wielu lat jest najczęściej przyznawanym certyfikatem w Polsce. Jego wysoka popularność wynika z tego, że bazuje on na europejskich normach i przepisach budowlanych, z możliwością dostosowania ich do wymagań krajowych. Według danych za rok 2021 wykorzystano go do certyfikacji ponad 590 tys. obiektów w 85 krajach [2].

Głównym celem BREEAM jest promowanie projektowania i budowy bardziej ekologicznych, efektywnych energetycznie i przyjaznych dla użytkowników budynków. Proces certyfikacji dotyczyć może również istniejących obiektów i jest oparty na przyznawaniu punktów za spełnienie wymagań w określonych kategoriach. Suma punktów jest przeliczana na wynik procentowy w odniesieniu do całej puli punktów

możliwych do zdobycia. Ostatecznie przyznawany jest certyfikat na jednym z pięciu poziomów: *Pass*, *Good*, *Very Good*, *Excellent* lub *Outstanding* [3].

Przykładem budynku, który uzyskał certyfikat BREEAM na poziomie *Outstanding*, jest biurowiec V.Offices znajdujący się w Krakowie (rys. 2.3).



RYS. 2.3. Biurowiec V.Offices

ŹRÓDŁO: <https://www.urbanity.pl/malopolskie/krakow/biurowiec-afi-park,b13131> [dostęp: 30.07.2024].

2.3. LEED

Certyfikacja LEED jest jednym z najbardziej znanych i powszechnie stosowanych systemów certyfikacji zrównoważonego budownictwa na świecie. Oferuje ona szeroki zestaw kryteriów oceny, które pomagają budynkom spełnić standardy efektywności energetycznej, wykorzystania zasobów, jakości środowiska wewnętrznego, a także innych aspektów.

Pierwszym krokiem w procesie certyfikacji jest dobranie jednej z pięciu procedur (programów) dedykowanych: budynkom nowo powstającym, obiektom istniejącym, wykończeniu wewnątrz, projektom urbanistycznym lub domom mieszkalnym. Następnie budynek jest oceniany w dziewięciu głównych kategoriach. W celu zarejestrowania obiektu w systemie LEED i rozpoczęcia procesu certyfikacji należy spełnić wszystkie wymagania wstępne i przesłać dokumentację obiektu w języku angielskim. Kończącym etapem procesu certyfikacji jest akceptacja przez GBCI (ang. Green Business Certification Inc.). Punktacja uzyskana przez obiekt budowlany klasyfikuje go do jednego z czterech poziomów: *Certified*, *Silver*, *Gold* lub *Platinum* [4].

Przykładem obiektu, który uzyskał certyfikat na najwyższym poziomie LEED, czyli *Platinum*, jest Nowy Rynek budynek D (rys. 2.4), znajdujący się w Poznaniu i łączący funkcje biurowe oraz usługowo-handlowe.



RYS. 2.4. Nowy Rynek, budynek D1 i D2

ŹRÓDŁO: <https://baza.plgbc.org.pl/building/nowy-rynek-budynek-d1-2/> [dostęp: 30.07.2024].

2.4. WELL

WELL Building Standard to system certyfikacji wielokryterialnej budynków wprowadzony przez firmę Delos w latach 2007–2014 w Stanach Zjednoczonych. Obecnie stosowane są jego dwie wersje – WELL v1 oraz WELL v2 (w fazie pilotażowej) [5].

W ramach certyfikacji WELL priorytetem jest realizacja określonych cech lub strategii na podstawie dziesięciu głównych kategorii. Każda z nich jest podzielona na podkategorie zawierające warunki wstępne i warunki opcjonalne, podwyższające ocenę. Stosowana jest skala punktowa i podobnie jak w systemie LEED można uzyskać ocenę na jednym z czterech poziomów: *Certified*, *Silver*, *Gold* lub *Platinum*. Weryfikację spełnienia warunków przeprowadza upoważniony agent ds. testów wydajności firmy WELL, który bada dokumentację projektu, przeprowadza serię testów i wykonuje niezbędne pomiary [6].

Jednym z przykładów obiektu certyfikowanego w systemie WELL jest wieżowiec Varso Tower znajdujący się w Warszawie (rys. 2.5). Jest to obecnie najwyższy budynek w Polsce, który w 2021 r. otrzymał certyfikat WELL na poziomie *Platinum*.



RYS. 2.5. Varso Tower

ŹRÓDŁO: <https://www.officelist.pl/oferta/varso-tower> [dostęp: 30.07.2024].

3. Analiza porównawcza certyfikatów BREEAM, LEED i WELL

3.1. Metodyka

Analiza porównawcza jest procesem porównywania i kontrastowania różnych elementów, zjawisk, danych lub parametrów w celu zrozumienia ich wzajemnych relacji, różnic, podobieństw oraz implikacji. Procedura porównawcza pozwala na zidentyfikowanie trendów, wzorów i różnic między analizowanymi elementami, a także pomaga w procesie podejmowania decyzji, umożliwiając wybór rozwiązania optymalnego [7].

W artykule przedstawiono, zestawiono i porównano najbardziej istotne informacje o certyfikatach BREEAM, LEED i WELL. Następnie wybrano trzy wspólne kryteria dla rozpatrywanych systemów certyfikacji, które szczegółowo omówiono i skonfrontowano: zarządzanie wodą, skomunikowanie budynku i wymagania dotyczące materiałów. W dalszej kolejności przedyskutowano otrzymane rezultaty wykonanej analizy, wyciągnięto z niej wnioski, a następnie podsumowano zrealizowane badania.

3.2. Podstawowe informacje o certyfikatach

Dane dotyczące trzech systemów certyfikacji wielokryterialnej budynków wybranych do analizy zostały pozyskane z oficjalnych stron organizacji certyfikujących [3, 4, 6], artykułów naukowych [8], materiałów udostępnionych przez Polskie Stowarzyszenie

Budownictwa Ekologicznego PLGBC [5] oraz poradnika wydanego przez Sweco Polska [2].

Informacje wykorzystane do analizy zestawiono w formie tabelarycznej (tab. 3.1) i odnoszą się one do aktualnie obowiązujących wersji każdego z systemów certyfikacji:

- BREEAM International New Construction Version 6.0,
- LEED v4.1 Building Design and Construction,
- The WELL building Standard version 2 (WELL v2).

TABELA 3.1. Podstawowe informacje o systemach certyfikacji BREEAM, LEED i WELL

	BREEAM	LEED	WELL
Kraj pochodzenia	Wielka Brytania	Stany Zjednoczone	Stany Zjednoczone
Data powstania	1990	1998	2014
Organizacja certyfikująca	The Building Research Establishment (BRE)	USGBC (U.S. Green Building Council) GBCI (Green Business Certification Inc.)	International WELL Building Institute (IWBI)
Okres przyznawania	bezterminowo	bezterminowo	na okres 3 lat
Główne procedury certyfikacji	• <i>New Construction</i> (budynki nowo powstałe), • <i>In-Use</i> (obiekty istniejące) • <i>Refurbishment & Fit-Out</i> (renowacja i wykończenia) • <i>Communities</i> (projekty urbanistyczne) • <i>Infrastructure</i> (projekty infrastrukturalne)	• <i>Building Design and Construction</i> (budynki nowo powstałe) • <i>Interior Design and Construction</i> (wykończenie wnętrz) • <i>Building Operations and Maintenance</i> (obiekty istniejące) • <i>Neighborhood Development</i> (projekty urbanistyczne) • <i>Homes</i> (domy mieszkalne)	• <i>New and Existing Buildings</i> (budynki nowo powstałe) • <i>New and Existing Interiors</i> (nowe i istniejące wnętrza) • <i>Core and Shell</i> (obiekty w stanie deweloperskim)
System oceny	procentowy (max 100%)	punktowy (max 110 pkt)	punktowy (max 110 pkt)
Poziomy ocen	• <i>Pass</i> (30–45%) • <i>Good</i> (45–55%) • <i>Very good</i> (55–70%) • <i>Excellent</i> (70–85%) • <i>Outstanding</i> (ponad 85%)	• <i>Certified</i> (40–49 pkt) • <i>Silver</i> (50–59 pkt) • <i>Gold</i> (60–79 pkt) • <i>Platinum</i> (ponad 80 pkt)	• <i>Certified</i> (40–49 pkt) • <i>Silver</i> (50–59 pkt) • <i>Gold</i> (60–79 pkt) • <i>Platinum</i> (ponad 80 pkt)

	BREEAM	LEED	WELL
Oceniane kategorie	10 głównych kategorii: • zarządzanie • zdrowie i dobre samopoczucie • energia • transport • woda • materiały • odpady • wykorzystanie terenu i ekologia • zanieczyszczenia • innowacje	9 głównych kategorii: • zintegrowany proces inwestycji • lokalizacja i transport • zrównoważone zagospodarowanie terenu • efektywna gospodarka wodna • energia i atmosfera • materiały i zasoby • jakość środowiska zewnętrznego • innowacyjność • priorytet regionalny	10 głównych kategorii: • powietrze • woda • odżywianie • światło • ruch • komfort termiczny • akustyka • materiały • umysł • społeczność
Liczba podkategorii	57	113	124
Udział konsultanta w procesie certyfikacji	wymagany licencjonowany asesor, zalecany konsultant BREEAM AP	niewymagany, ale dodatkowo punktowany konsultant LEED AP	wymagany licencjonowany asesor, zalecany konsultant WELL AP
Język dokumentacji	główny raport w języku angielskim, załączone materiały mogą być w języku polskim	pełna dokumentacja w języku angielskim	pełna dokumentacja w języku angielskim
Udział na polskim rynku	81,6% (1336 budynków)	13,8% (226 budynków)	0,9% (15 budynków)
Liczba państw, w których występują	85	168	48
Zgodność z innymi certyfikatami	można łączyć z WELL	można łączyć z WELL	można łączyć z BREEAM i LEED

ŹRÓDŁO: opracowanie własne na podstawie [2, 3, 4, 5, 6, 8].

Porównując punktowane kategorie, można stwierdzić, że analizowane systemy różnią się w kwestii priorytetów i stawianych wymagań. BREEAM i LEED kładą nacisk na zrównoważony rozwój środowiska, a certyfikat WELL skupia się na zdrowiu i samopoczuciu użytkowników budynku.

Z punktu widzenia inwestora najistotniejszy jest koszt uzyskania każdego z certyfikatów. Nie da się go jednak jednoznacznie sprecyzować, ponieważ zależy od wielu czynników, takich jak przeznaczenie obiektu, jego wielkość oraz sposób budowy. Ponadto głównym kosztem nie jest przejście samego procesu certyfikacji, ale zastosowanie różnych rozwiązań projektowych wymaganych przez poszczególne systemy, których kosztów nie da się w prosty sposób określić.

Istotną różnicą jest to, że certyfikaty BREEAM i LEED uzyskuje się bezterminowo, a WELL musi być odnawiany co 3 lata. Ponadto dodatkową zaletą systemu BREEAM jest to, że część dokumentacji potrzebnej do uzyskania certyfikatu może być w języku polskim, a w przypadku pozostałych systemów obowiązuje jedynie język angielski.

3.3. Porównanie wybranych podkategorii

Podstawowym celem inwestorów i projektantów w procesie certyfikacji jest osiągnięcie przez budynek jak najwyższej oceny. W 2023 r. aż 81% obiektów certyfikowanych w ramach systemu BREEAM osiągnęło poziomy *Very Good* i *Excellent*, ale jedynie 3% uzyskało najwyższy stopień *Outstanding*. Sytuacja wygląda inaczej w przypadku certyfikatu LEED – najwyższy stopień *Platinum* zdobyło aż 36% budynków. Różnica ta wynika przede wszystkim z różnych wymagań stawianych przez poszczególne systemy certyfikacji [1].

Poniżej porównano kilka punktowanych podkategorii, które zestawiono w trzech wybranych w toku przeglądu literatury obszarach: zarządzanie wodą, skomunikowanie budynku i wymagania stawiane materiałom. Obszary te są istotne w każdym z analizowanych systemów i na ich podstawie można określić, na co położony jest nacisk w poszczególnych metodach certyfikacji. Ponieważ liczba przyznawanych punktów różni się w zależności od wielkości i rodzaju obiektu, na potrzeby analizy porównawczej skupiono się na danych odnoszących się do nowo powstałych obiektów biurowych oraz maksymalnej liczby punktów, jaką mogą one otrzymać.

3.3.1. Zarządzanie wodą

Woda i racjonalne nią gospodarowanie to główne kategorie w każdym z analizowanych certyfikatów. System LEED skupia się na redukcji i monitorowaniu jej zużycia. Stosowanie armatury o niskim zużyciu wody oraz różnego rodzaju urządzeń pomiarowych jest nie tylko dodatkowo punktowane, lecz także ujęte w wymaganiach minimalnych do uzyskania certyfikatu. Z kolei certyfikat WELL kładzie nacisk na jakość wody pitnej dostępnej w budynkach. Stawiane są wymagania odnoszące się do zmętnienia wody, jej składu chemicznego i możliwości zanieczyszczenia bakteriami. System BREEAM podkreśla zarówno kwestię związaną z redukcją i opomiarowaniem zużycia wody, jak i dbaniem o jej wysoką jakość i brak skażenia. W tabeli 3.2 zestawiono różne podejścia do zarządzania wodą w rozpatrywanych systemach certyfikacji budynków.

TABELA 3.2. Podejście do zarządzania wodą w systemach certyfikacji BREEAM, LEED i WELL

	BREEAM	LEED	WELL
Punktowane podkategorie	• Wat 01 (5 pkt): zużycie wody • Wat 02 (1 pkt): monitoring zużycia wody • Wat 03 (3 pkt): wykrywanie wycieków w instalacjach • Wat 04 (1 pkt): systemy efektywnie wykorzystujące wodę • Hea 09 (1 pkt): jakość wody użytkowej	• WEc1 (2 pkt): ograniczenie zużycia wody na terenie • WEc2 (6 pkt): ograniczenie zużycia wody w budynku • WEc3 (2 pkt): optymalizacja procesu użycia wody • WEc4 (1 pkt): pomiar zużycia wody • SSc4 (3 pkt): zarządzanie wodą deszczową	• W04 (2 pkt): podwyższona jakość wody • W05 (3 pkt): zarządzanie jakością wody pitnej • W06 (1 pkt): dostępność wody pitnej • W07 (3 pkt): zarządzanie wilgocą • W08 (4 pkt): wsparcie w zakresie higieny • W09 (2 pkt): pozyskiwanie i wykorzystanie wody niezdatnej do picia
Wymagania wstępne	• minimalizacja ryzyka skażenia mikrobiologicznego np. bakterią Legionella	• brak konieczności stałego nawadniania terenu lub redukcja nawadniania • wyposażenie redukujące zużycie wody • stałe wodomierze i raportowanie zużycia wody	• wymagania dotyczące zmgętnienia wody i zawartości bakterii E. coli • wymagania dotyczące zawartości związków chemicznych • monitorowanie jakości wody i kontrola występowania bakterii Legionella
Maksymalna liczba punktów	11	14	18

ŹRÓDŁO: opracowanie własne na podstawie [3, 4, 6].

3.3.2. Skomunikowanie budynku

Różnice między analizowanymi certyfikatami są najlepiej widoczne w podejściu do skomunikowania obiektu ze środowiskiem zewnętrznym. W systemie BREEAM dodatkowe punkty można otrzymać za optymalną lokalizację budynku, w pobliżu transportu publicznego i lokalnych usług. Kładziony jest nacisk na maksymalne skrócenie drogi potrzebnej do pokonania przez pracowników budynku. Punkty można otrzymać również za jak największą pojemność parkingu, co znacząco różni się od podejścia w systemie LEED, który z kolei premiuje redukcję liczby miejsc postojowych. W tym certyfikacie skupiono się na ułatwieniu dostępu do bezemisyjnych środków transportu, takich jak rowery czy samochody elektryczne. Całkowicie inaczej zagadnienie skomunikowania budynku podjęte jest w systemie WELL. Nacisk położony jest nie na możliwości dojechania do budynku, ale na sposoby poruszania się użytkowników po obiekcie. Wiele dodatkowych punktów otrzymać można za wyeksponowanie klatek schodowych i zastosowanie ergonomicznych rozwiązań

projektowych, ale przede wszystkim zaakcentowana jest promocja aktywności fizycznej i prozdrowotnych zachowań. Zestawienie różnic i podobieństw w zakresie skomunikowania budynku przedstawiono w tabeli 3.3.

TABELA 3.3. Podejście do skomunikowania budynku w systemach certyfikacji BREEAM, LEED i WELL

	BREEAM	LEED	WELL
Punktowane podkategorie	• Tra 01 (5 pkt): dostępność publicznego transportu • Tra 02 (2 pkt): dostęp do lokalnych usług • Tra 03 (2 pkt): alternatywne środki transportu • Tra 04 (2 pkt): maksymalna pojemność parkingu • Tra 05 (1 pkt): zrównoważony plan podróży • Tra 06 (1 pkt): możliwość pracy z domu	• LTc 01 (1 pkt): ochrona wrażliwych gruntów • LTc 02 (2 pkt): teren o wysokim priorytecie • LTc 03 (5 pkt): gęstość zaludnienia i różnorodność wykorzystania • LTc 04 (5 pkt): dostęp do wysokiej jakości transportu • LTc 05 (1 pkt): udogodnienia dla rowerów • LTc 06 (1 pkt): redukcja wielkości parkingów • LTc 07 (1 pkt): pojazdy elektryczne	• V03 (3 pkt): ekspozycja klatek schodowych • V04 (3 pkt): udogodnienia dla aktywnych użytkowników • V05 (4 pkt): planowanie i wybór lokalizacji • V06 (2 pkt): możliwość uprawiania aktywności fizycznej • V07 (2 pkt): aktywne wyposażenie budynku • V08 (2 pkt): przestrzeń i sprzęt do aktywności fizycznej • V09 (1 pkt): promowanie aktywności fizycznej • V10 (1 pkt): promowanie zachowań zdrowotnych • V11 (3 pkt): projektowanie ergonomiczne
Wymagania wstępne	• brak	• brak	• co najmniej 1 pkt z jednej z podkategorii V03-V05 lub V08 • wymagania dotyczące ergonomii miejsca pracy
Maksymalna liczba punktów	13	16	21

ŹRÓDŁO: opracowanie własne na podstawie [3, 4, 6].

3.3.3. Wymagania dotyczące materiałów budowlanych

W kwestii wymagań stawianych materiałom wykorzystywanym podczas budowy obiektu systemy BREEAM, LEED i WELL punktują podobne zagadnienia. Są one częściowo zbieżne z wymaganiami stawianymi wszystkim nowo powstałym budynkom przez polskie prawodawstwo, a w szczególności przez ustawę Prawo budowlane [9]

oraz Ustawę o wyrobach budowlanych [10]. Istotną kwestią jest redukcja znaczenia materiałów w całym cyklu życia budynku, a także stosowanie materiałów certyfikowanych, ze znanym składem chemicznym i właściwościami. Tym, co wyróżnia BREEAM, jest wymaganie krytycznie odnoszące się do stosowania jedynie legalnie pozyskanego drewna i zakazu stosowania azbestu. LEED natomiast ogranicza użycie materiałów zawierających rtęć. System WELL rozszerza wymagania dotyczące składu materiałów i podkreśla ich wpływ na zdrowie użytkowników budynku. Punkty można uzyskać za wybór powłok i substancji o niskiej lub zerowej emisji związków lotnych, a także za stosowanie certyfikowanych materiałów. Porównanie wymagań stawianych wykorzystywanym materiałom przedstawiono w tabeli 3.3.

TABELA 3.4. Wymagania stawiane materiałom w systemach certyfikacji BREEAM, LEED i WELL

	BREEAM	LEED	WELL
Punktowane podkategorie	• Mat 01 (6 pkt): zmniejszenie wpływu na cykl życia budynku • Mat 03 (4 pkt): odpowiedzialne pozyskiwanie materiałów budowlanych • Mat 05 (1 pkt): projektowanie pod kątem trwałości i odporności • Mat 06 (1 pkt): optymalizacja wykorzystania materiałów	• MRc1 (5 pkt): zmniejszenie wpływu na cykl życia budynku • MRc2 (2 pkt): użycie materiałów z deklaracjami środowiskowymi produktu • MRc3 (2 pkt): racjonalne pozyskiwanie surowców • MRc4 (2 pkt): wykorzystanie materiałów ze znanym składem i właściwościami	• X05 (2 pkt): zaawansowane wymagania materiałowe • X06 (4 pkt): ograniczenie emisji lotnych związków dla powłok na przegrodach budynku • X07 (3 pkt): wybór certyfikowanych materiałów • X08 (2 pkt): optymalizacja wyboru materiałów
Wymagania wstępne	• użycie legalnie pozyskanego drewna • zakaz materiałów zawierających azbest	• ograniczenie materiałów zawierających rtęć	• ograniczenia w stosowaniu materiałów zawierających azbest, rtęć i ołów
Maksymalna liczba punktów	12	11	11

ŹRÓDŁO: opracowanie własne na podstawie [[3], [4], [6].

4. Podsumowanie

W opracowaniu scharakteryzowano trzy popularne w Polsce systemy: BREEAM, LEED i WELL. Dominacja na polskim rynku pierwszego z nich prawdopodobnie nie ulegnie zmianie, ponieważ jest on najlepiej dostosowany do krajowych standardów i jest przyznawany bezterminowo. Prognozować jednak można wzrost znaczenia certyfikatu WELL. Obejmuje on zagadnienia związane ze zdrowiem i samopoczuciem użytkowników obiektu, co odróżnia go od dwóch pozostałych systemów.

Z analizy porównawczej wynika, że tematyka zarządzania wodą oraz wyboru materiałów stosowanych podczas budowy jest bardzo ważna i wysoko punktowana zarówno przez BREEAM, LEED, jak i WELL. Projektanci powinni zwracać szczególną uwagę na te kwestie ze względu na liczne wymagania krytyczne stawiane przez systemy certyfikacji, a więc takie, które musi spełnić każdy obiekt ubiegający się o przyznanie certyfikatu. Istotne różnice między analizowanymi systemami odnotowano w przypadku podejścia do zagadnienia skomunikowania budynku. Ten obszar powinien być docelowo zaprojektowany pod uzyskanie jednego z wybranych certyfikatów, gdyż wymagania stawiane przez BREEAM, LEED i WELL niejednokrotnie wykluczają się wzajemnie.

Rosnąca popularność certyfikacji wielokryterialnej zmusza inwestorów do rozważenia uzyskania jednego z certyfikatów budynków. Systemy certyfikacji wiążą się ze znacznymi nakładami finansowymi i czasowymi, stąd świadomy wybór odpowiedniego certyfikatu jest kluczowy dla osiągnięcia zamierzonych celów przedsięwzięcia budowlanego.

Literatura

- [1] PLGBC Polskie Stowarzyszenie Budownictwa Ekologicznego, *Zrównoważone Certyfikowane Budynki – Raport 2023*, <https://plgbc.org.pl/zrownowazone-budownictwo/publikacje/> [dostęp: 15.02.2024].
- [2] Bezoń P., Bieniecka A., Cierpisz M., Dolniak M., Garnczarska J., Gawroński M., Hojniak D., Mikołajczyk W., Mizerny J., Pirańska K., Płatek D., Płóciennik A., Przepiórkiewicz K., Rosińska K., Warda M., *Certyfikacja wielokryterialna budynków. Poradnik*, Sweco Polska, 2021.
- [3] BRE Global, *BREEAM International New Construction, Version 6.0*, www.breeam.com [dostęp: 15.02.2024].
- [4] U.S. Green Building Council, *LEED v4.1 Building Design and Construction*, <https://www.usgbc.org/leed/v4> [dostęp: 15.02.2024].
- [5] PLGBC Polskie Stowarzyszenie Budownictwa Ekologicznego, strona internetowa, <https://plgbc.org.pl/zrownowazone-budownictwo/certyfikacje-wielokryterialne/> [dostęp: 15.02.2024].
- [6] International WELL Building Institute, strona internetowa, <https://v2.wellcertified.com/en> [dostęp: 15.02.2024].
- [7] Szarucki M., *Metodyka analizy porównawczej w badaniach międzynarodowych*, „Zeszyty Naukowe Uniwersytetu Ekonomicznego w Krakowie” 2010, nr 827, s. 51–66.

- [8] Taczalska-Ryniak A., *Wielokryterialna certyfikacja budynków biurowych jako wyznacznik nowoczesności i jakości środowiska pracy*, „Zeszyty Naukowe Małopolskiej Wyższej Szkoły Ekonomicznej w Tarnowie” 2019, t. 41, nr 1, s. 103–124.
- [9] Ustawa z dnia 7 lipca 1994 r. – Prawo budowlane (Dz.U. z 2023 r. poz. 682 ze zm.).
- [10] Ustawa z dnia 16 kwietnia 2004 r. o wyrobach budowlanych (Dz.U. z 2021 r. poz. 1213 ze zm.).

Układ napędowy motocykla elektrycznego zasilanego ogniwami litowo-jonowymi

Ernest Przychodzki, Nikodem Zych

*Politechnika Lubelska, Koło Naukowe „Mechatronik”
ernest.przychodzki@pollub.edu.pl*

Summary: In the paper, a design and development methodology of the drive for the electric motorcycle is presented. The application of a field-oriented control method for a permanent magnet motor is shown. The measurement approach of the key drive parameters is elaborated on, to establish a stable control system. In addition, the critical design calculations used in selection of the components are shown. Finally, a model-based design is used in development of the drives software, utilizing the automatic code generation for the microcontroller platform.

Key words: code generation, field-oriented control, electric drive

1. Wprowadzenie

Elektromobilność na całym świecie zyskuje na popularności, silniki spalinowe w pojazdach są zastępowane przez silniki elektryczne zasilane z baterii. Technologie w tej dziedzinie rozwijają się błyskawicznie, a dotychczasowe rozwiązania są udoskonalane. Pojazdy zasilane energią elektryczną mają wiele zalet w porównaniu z pojazdami spalinowymi, m.in. niskoemisyjność, większe przyspieszenie, niższe koszty eksploatacji, cisza pracy i komfort jazdy. Czynnikiem sprzyjającym wzrostowi znaczenia elektromobilności niezaprzeczalnie jest rozwój odnawialnych źródeł energii, które mogą stanowić tanie źródło energii elektrycznej potrzebnej do ładowania pojazdów [2]. Powstało już wiele rodzajów pojazdów elektrycznych, a jednym z nich jest motocykl. Autorzy chcą przedstawić doświadczenia Koła Naukowego „Mechatronik” na temat projektowania takiego pojazdu.

2. Dobór elementów układu napędowego

Układ napędowy motocykla elektrycznego składa się z: silnika elektrycznego, przekształtnika DC/AC nazywanego często falownikiem, pakietu baterii, modułu BMS, układów do pomiaru wartości prądów i dokładnej pozycji silnika oraz mikrokontrolera sterującego. Dodatkowo należy uwzględnić mechaniczne elementy, takie jak przekładnia, zawieszenie, hamulce, koła, rama od motocykla Yamaha YZF 426, która została zmodyfikowana na potrzeby dostosowania jej do napędu elektrycznego [5].

Przy tworzeniu motocykla z napędem elektrycznym, wykorzystując metodologię Model Based Design, postawiono następujące cele:

- pojazd porusza się głównie po płaskich drogach asfaltowych o niewielkich wzniesieniach;
- prędkość maksymalna pojazdu wynosi 120 km/h;
- zastosowanie silnika bezszczotkowego prądu stałego;
- zastosowanie przekładni łańcuchowej;
- możliwość jazdy przy prędkości 80 km/h przez 30 min;
- wykonanie własnego algorytmu sterowania za pomocą automatycznej generacji kodu.

3. Dobór silnika elektrycznego

Silnik bezszczotkowy BLDC to zaawansowany napęd elektryczny, który eliminuje konieczność stosowania tradycyjnych szczotek w celu komutacji na rzecz komutatora elektronicznego. Ze względu na małe gabaryty silnik ten oferuje wysoką sprawność energetyczną, płynną pracę, małe straty energii i dobrą dynamikę pracy, co sprawia, że jest idealnym rozwiązaniem dla różnorodnych zastosowań, od elektroniki użytkowej po pojazdy elektryczne.

Aby poprawnie dobrać silnik dla pojazdu jezdnego przeznaczonego do poruszania się po drogach, należy wziąć pod uwagę opory, na jakie będzie natrafiał jednoślad. Można wyznaczyć dwa główne opory [1]:

- aerodynamiczny – związany z oddziaływaniem powietrza na motocykl, zwiększa się wraz z prędkością pojazdu;
- toczenia – wynikający z tarcia między oponami a powierzchnią drogi, zależy od rodzaju powierzchni, rodzaju i stanu opon oraz ciśnienia w oponach.

4. Opór aerodynamiczny

Powierzchnię czołową pojazdu przyjęto jako równą średniej dla motocykla o pojemności silnika z pozycją kierowcy normalną, siedzącą, lekko pochyloną i wynosi ona. Współczynnik oporu powietrza przyjęto 1,1. Prędkość względna równa prędkości maksymalnej przyjętej w założeniach.

$$F_p = 0,047 \cdot c_x \cdot A \cdot V_w^2 = 0,047 \cdot 1,1 \cdot 0,64 \cdot 120^2 = 476,47 N \quad (1)$$

gdzie: c_x jest współczynnikiem oporu powietrza, A jest powierzchnią czołową pojazdu, jest prędkością względną w km/h.

5. Opór toczenia pojazdu

Oszacowana przez autorów maksymalna masa pojazdu wynosi:

$$\begin{aligned} W &= W_{ramy} + W_{silnik} + W_{falownik} + W_{baterii} + W_{kierowcy} = \\ &= 50 + 12 + 8 + 80 + 110 = 260 kg \end{aligned} \quad (2)$$

Droga, po jakiej się porusza, jest asfaltowa. Prędkość motocykla wynosi 120 km/h. Wartość współczynnika oporu toczenia opony motocykla przyjęto równą 0,02.

$$F_t = \mu \cdot W \cdot g = 0,02 \cdot 260 \cdot 9,81 = 51,012 N \quad (3)$$

gdzie: μ jest współczynnikiem toczenia opony motocykla, W jest wagą całkowitą pojazdu wraz z kierowcą, g jest przyspieszeniem ziemskim.

6. Całkowity opór ruchu

Jest to suma wszystkich oporów ruchu towarzyszących podczas jazdy.

$$F_{op} = F_t + F_p = 51,012 + 476,47 = 527,48 N \quad (4)$$

7. Zapotrzebowanie mocy i momentu

Moc, jaka jest potrzebna na kole motocykla przy całkowitym oporze ruchu równym 527,48 N, wyliczono ze wzoru [4]:

$$F_{koło} = F_{op} \cdot V = \frac{527,48 \cdot 120}{3600} = 17,6 kW \quad (5)$$

gdzie: F_{op} to całkowity opór ruchu działający na pojazd, V to prędkość założona.

Tylne koło, które jest kołem napędowym w motocyklu, ma średnicę 18 cali, co odpowiada 0,457 m. Moment wymagany na kole wynosi:

$$T_k = F_{op} \cdot r = 527,48 \cdot \frac{0,457}{2} = 125,31 Nm \quad (6)$$

gdzie: F_{op} jest całkowitym oporem ruchu działającym na pojazd, r jest promieniem koła napędowego.

8. Wybór silnika i przekładni

Wybrany został silnik bezszczotkowy BLDC o parametrach [5]:

- napięcie zasilania: 96 V;
- moc pracy ciągłej: 7,5 kW;
- maksymalny prąd pobierany przy pracy ciągłej: 150 A;
- prędkość obrotowa przy maksymalnej mocy: 3600 obr/min.

Przekładnię łańcuchową z dwoma zębatkami dobrano na podstawie wybranego silnika. Przyjmujemy sprawność przekładni na poziomie 0,99:

- Z_1 – koło zębate na wale silnika, czternastozębne;
- Z_2 – koło zębate na kole napędowym, trzydziestopięciozębne.

$$\eta = \frac{Z_1}{Z_2} = \frac{14}{35} = 0,4 \quad (7)$$

Dla dobranej przekładni obliczamy moc przekazywaną na koło napędowe.

$$P_{max} = \frac{P_N}{\eta} \cdot \vartheta = \frac{7,5}{0,4} \cdot 0,99 = 18,56 \text{ kW} > 17,6 \text{ kW} \quad (8)$$

gdzie: P_N jest mocą dobranego silnika, η jest wartością przekładni, ϑ jest wartością sprawności [5].

Dobraný silnik bezszczotkowy dostarczy wystarczającej mocy na koło napędowe. Dla dobranej przekładni prędkość obrotowa wynosi:

$$V = n_N \cdot \eta \cdot \vartheta = 3600 \cdot 0,4 \cdot 0,99 = 1425,6 \frac{\text{obr}}{\text{min}} \quad (9)$$

gdzie: n_N to prędkość obrotowa dobranego silnika BLDC, η to przekładnia, ϑ to sprawność.

9. Dobór akumulatora

Prędkość obrotowa silnika wynosząca 1425,6 obr/min jest prędkością maksymalną osiąganą przez układ napędowy. Do uzyskania założonej prędkości 120 km/h koło musi się kręcić z prędkością obrotową równą 1392,76 obr/min, co jest osiągalne przy dobranych elementach [5].

$$n_{120} = \frac{V}{2r} = \frac{120 \cdot 1000 \frac{m}{min}}{1,436m} = 1392,76 \frac{\text{obr}}{\text{min}} \quad (10)$$

Następnym warunkiem do spełnienia jest przemieszczanie się ze stałą prędkością 80 km/h przez pół godziny. Moc potrzebna na kole przy tej prędkości wynosi 11,72 kW [4]. Prędkość obrotowa, jaką musi osiągnąć koło, wynosi 928,5 obr/min [8]. Moc ta w stosunku do mocy maksymalnej osiągniętej przez silnik po przejściu przez przekładnię wynosi:

$$\frac{P_{80}}{P_{max}} = \frac{11,72}{18,56} \cdot 100\% = 63,15\% \quad (11)$$

Moc pobierana przez silnik wynosi wtedy 63,15% mocy znamionowej.

$$P_{80} = P_N \cdot 63,15\% = 7,5 \cdot 63,15\% = 4,74 \text{ kW} \quad (12)$$

Przy mocy pobieranej przez silnik 4,74 kW przy napięciu zasilania wynoszącym 96 V nasz prąd pobierany z baterii wynosi

$$I_{120} = \frac{P_{80}}{U_{ZAS}} = \frac{4740}{96} = 49,38 \text{ A} \quad (13)$$

Przy godzinny użytkowaniu ze stałą prędkością 80 km/h wymagany jest akumulator o pojemności minimum 60 Ah. Wartość ta nie uwzględnia tego, że nie należy go rozładowywać do poziomu poniżej 80% DOD. Zgodnie z zaleceniami USABC i producentów akumulatorów trzeba dodatkowo doliczyć 30% pojemności, aby skompensować efekt starzenia się akumulatora. Końcowe zapotrzebowanie na pojemność baterii wynosi:

$$CC_{bat} = \frac{1,3 \cdot CC_{batTer}}{0,8} = \frac{1,3 \cdot 49,38}{0,8} = 80,23 \text{ Ah} \quad (14)$$

Dobrano akumulator litowy NMC 114Ah 22.2V +BMS60A/2000 cykli ze względu na najmniejszą wagę ze wszystkich dostępnych technologii na rynku [2].



RYS. 1. Dwa akumulatory litowo-jonowe w technologii NMC

ŹRÓDŁO: https://www.alibaba.com/product-detail/Cat1-4S1P-6S1P-12S1P-51Ah-92Ah_1600430484916.html?spm=a2700.galleryofferlist.p_offer.d_title.1f633c2bMHmmSg&s=p [dostęp: 30.07.2024].

Parametry techniczne baterii:

- napięcie nominalne: 22,2 V;
- zakres napięć: 16,5–25,2 V;
- pojemność nominalna: 114 Ah;
- chwilowy prąd rozładowania: ograniczony elektronicznie przez BMS;
- waga: 11,6 kg.

Zapotrzebowanie napięciowe dobrego silnika bezszczotkowego BLDC wynosi 96 V. W celu uzyskania takiej wartości połączono szeregowo cztery dobre akumulatory. Do pomiarów napięcia zostanie użyty gotowy układ BMS (*Battery Management System*).

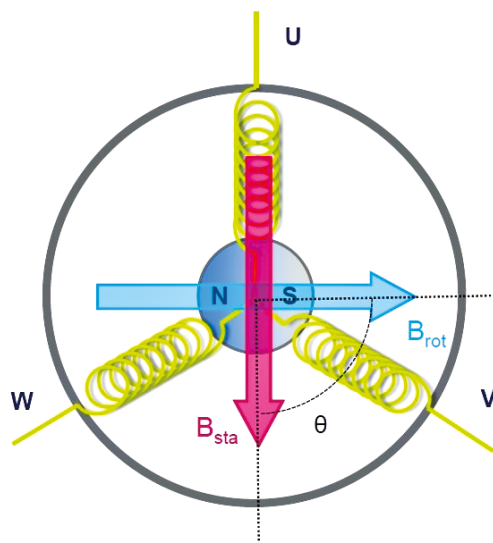
10. Sterowanie wektorowe

Do prawidłowej pracy układu napędowego motocykla konieczne jest zapewnienie możliwości pracy przy niskich prędkościach obrotowych. W silniku elektrycznym jest to utrudnione zarówno przez wysoki moment rozruchowy silnika, jak i opory tarcia całego pojazdu. Stosując metodę wektorową sterowania silnikiem trójfazowym, jesteśmy w stanie osiągnąć bardzo niskie prędkości obrotowe silnika i uzyskiwać przy tym ekonomiczną pracę układu. Ta zaawansowana metoda opiera się na zadawaniu stałego momentu napędowego na wirnik silnika poprzez odpowiednie kształtowanie przebiegów prądu uzależnionych od aktualnej pozycji silnika. W motocyklu zastosowano silnik BLDC, który na wirniku ma zamocowany magnes trwały wytwarzający stałe pole magnetyczne o pewnym wektorze przestrzennym. Sterując wartościami prądu w uzwojeniach w zależności od położenia wirnika, możliwe jest takie sterowanie polem elektromagnetycznym stojana, aby uzyskiwać odpowiednio do wirującego wektora pola magnetycznego rotora wirujący z taką samą prędkością wektor pola elektromagnetycznego stojana [8].

Rozpatrując wzór na moment siły w przypadku silnika elektrycznego, można dojść do pewnych wniosków. Jeżeli będziemy utrzymywać stały kąt pomiędzy naszymi wektorami oraz stałe wartości natężeń pól elektromagnetycznych, to wypadkowy moment na wale silnika też będzie stały. Stosując sterowanie wektorowe, jesteśmy w stanie utrzymywać kąt pomiędzy wektorami pól elektromagnetycznych stały równy 90°, co przekłada się na uzyskiwanie maksymalnego momentu przy danych wartościach prądu.

$$M = r \cdot F \cdot \sin \alpha \quad (15)$$

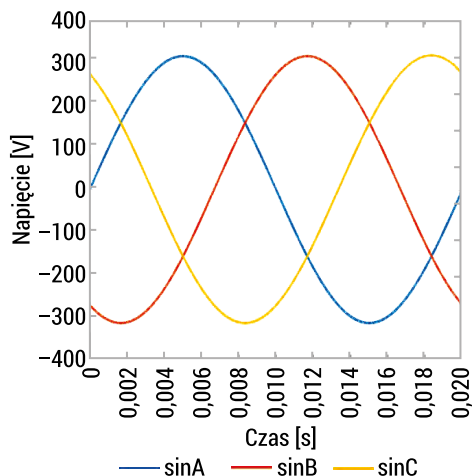
gdzie: r to promień, F to siła oddalona o r od naszego środka badanego obiektu, α kąt pomiędzy wektorami F i r .



RYS. 2. Przedstawienie graficzne wektorów pól elektromagnetycznych umieszczonych na wirniku

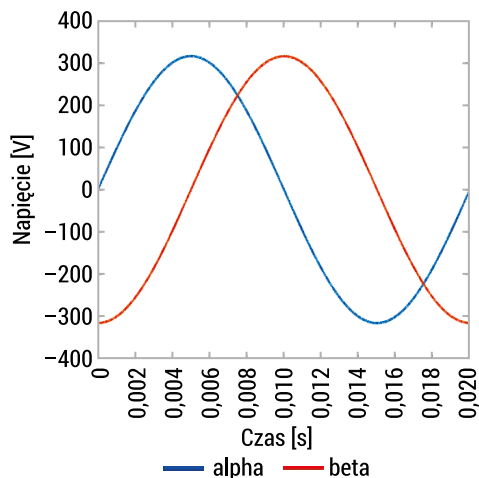
ŹRÓDŁO: <https://www.st.com/en/applications/industrial-motor-control/3-phase-field-oriented-control-foc.html> [dostęp: 30.07.2024].

Do sterowania wartością natężenia pola elektromagnetycznego wykorzystuje się przekształtnik, który pod wpływem zmiany szerokości impulsów załączania tranzystorów reguluje prąd płynący przez uzwojenia silnika. Przekształtnik DC/AC jest urządzeniem przetwarzającym napięcie stałe na napięcie przemienne o pewnych parametrach. W tym przypadku celem jest uzyskanie przebiegu prądu sinusoidalnego na wszystkich trzech fazach silnika. Przekształtnik DC/AC jest sterowany za pomocą mikrokontrolera, który wykonuje obliczenia z dużą dokładnością w czasie rzeczywistym i umożliwia precyzyjne zadawanie odpowiednich wartości prądów w uzwojeniach silnika. W przypadku trójfazowego silnika liczba obliczeń wykonywanych przez mikrokontroler jest bardzo duża i w celu ich ograniczenia stosuje się przekształcenia Clarke i Park. Przekształcenie Clarke pozwala zamienić trzy przebiegi sinusoidalne przesunięte względem siebie o 120° na dwa przesunięte o 90° . Transformacja Parke przekształca dwa przebiegi sinusoidalne na dwie wartości wektorów wirujących w przestrzeni. Te przekształcenia mają poprawić pracę regulatorów wykonywanych do sterowania układu przez mikrokontroler, co sprzyja dynamice całego układu. Regulatory te otrzymują informacje jako wartości dwóch zmiennych zamiast trzech przebiegów sinusoidalnych, przez co stabilność układu jest znacznie większa [3].



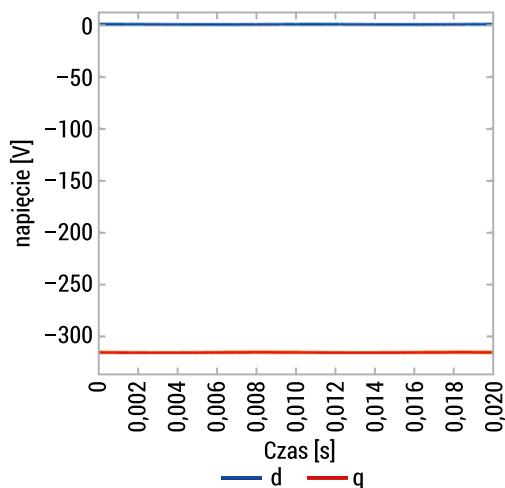
RYS. 3. Przebieg sinusoidalny trzech napięć przesuniętych fazowo o 120°

ŹRÓDŁO: opracowanie własne.



RYS. 4. Przebieg napięcia po zastosowaniu przekształcenia Clarke

ŹRÓDŁO: opracowanie własne.



RYS. 5. Wartości dwóch wektorów wirujących wraz z polem magnetycznym wirnika

ŹRÓDŁO: opracowanie własne.

11. Pomiary pozycji wirnika i prądów

Do utrzymywania stałej wartości kąta pomiędzy wektorami pól elektromagnetycznych, a co za tym idzie stałej wartości momentu na wale silnika, wymagana jest znajomość dokładnej pozycji wirnika. Znając ją, można precyzyjnie zadać odpowiednie

wartości prądów na uzwojenia silnika, co wytworzy odpowiednio przesunięty wektor pola magnetycznego stojana względem wektora pola wirnika. Stosując enkoder inkrementalny hallotronowy oraz kanały A/B/I do przesyłania informacji, jesteśmy w stanie określić pozycję. Na wale silnika umieszcza się odizolowany od niego magnes trwały, do którego w niedalekiej odległości umieszcza się czujnik Halla, który pod wpływem obrotu magnesu względem czujnika wykrywa zmienne pole magnetyczne i wysyła kanałami odpowiednie informacje. Podczas uruchomienia układu nie jest możliwe określenie pozycji wirnika, więc w czasie pierwszego obrotu sterowanie rektorowe nie pracuje w pełni zoptymalizowane [8].

Pomiary prądu potrzebne są, aby kontrolować zadawany moment na wał silnika. Konieczne jest porównywanie wartości zadanej z układu sterującego, w tym przypadku mikrokontrolera, do wartości odczytywanej z układu pomiarowego. Jako urządzenie pomiarowe wykorzystano czujniki Halla, które charakteryzują się dużą dokładnością pomiaru, a także są odizolowane od obwodu prądowego w przeciwieństwie do rezystora bocznikującego [6]. Zastosowanym czujnikiem Halla jest LEM LA200-P mający otwór, przez który jesteśmy w stanie przeprowadzić badany przewód. Czujnik Halla odczytuje prąd płynący przez przewód w dwóch kierunkach. Czujnik ten ma przekładnię prądową 2000:1, więc przy prądzie maksymalnym wynoszącym 200 A na wyjściu pomiarowym czujnika wytworzy się prąd o wartości 0,1 A. W celu odczytywania prądów przez przetwornik ADC na mikrokontrolerze zastosowano rezystor pomiarowy o wartości 16,5 Ω .

$$U_{pom} = R_{pom} \cdot I = 16,5 \cdot 0,1 = 1,65V \quad (16)$$

Napięcie to przy prądzie płynącym maksymalnym w uzwojeniu wynoszącym 200 A pozwoli na odczyt przez przetwornik ADC. Konieczne jest podniesienie poziomu napięcia układu pomiarowego względem mikrokontrolera o wartość 1,65 V; aby odczytywać prądy w obu kierunkach, potrzebny jest zakres napięcia w obu kierunkach. Rozdzielczość przetwornika ADC w użytych mikrokontrolerze wynosi 4095 bitów przy zakresie napięć wynoszącym 0–3,3 V. Przeliczając, ile V przypada na 1 bit, otrzymano:

$$k = \frac{3,3}{4095} = 0,806mV \quad (17)$$

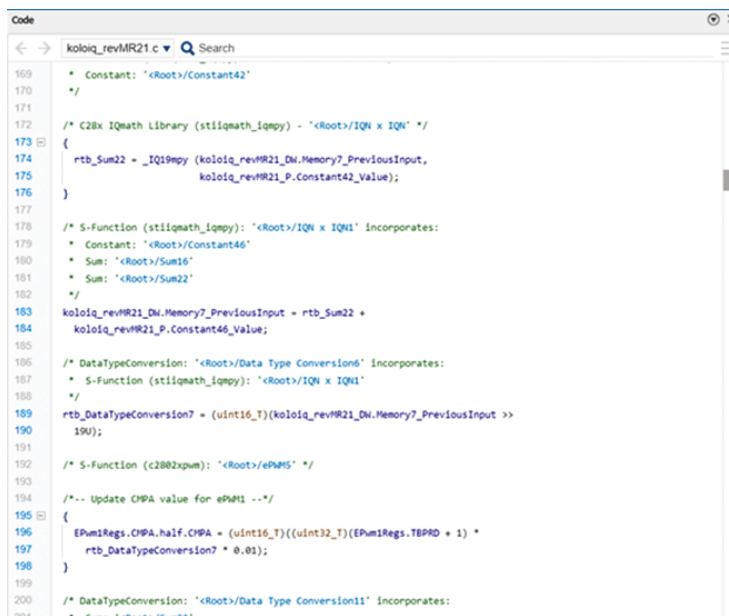
Przy prądzie maksymalnym płynącym w kierunku zgodnym z kierunkiem wskazywanym na czujniku Halla napięcie na przetworniku ADC wyniesie:

$$U_{200A} = R_{pom} \cdot I + 1,65 = 16,5 \cdot 0,1 + 1,65 = 3,3V \quad (18)$$

Wskazanie bitowe przetwornika ADC wyniesie dokładnie 4095 bitów.

12. Automatyczna generacja kodu

Przy użyciu środowiska Simulink programu MATLAB do budowania schematów blokowych jesteśmy w stanie wygenerować kod programu sterującego mikrokontrolerem. Przez tę wbudowaną w program funkcję możemy bez znajomości języka programowania korzystać ze wszystkich opcji obsługiwanych przez mikrokontroler oraz bardzo szybko dokonywać zmian programu. Drugą korzyścią jest bezpośrednie przenoszenie algorytmu sterowania z modelu symulacyjnego do rzeczywistego. W środowisku tym możliwe jest programowanie blokowe, a także przy zastosowaniu odpowiednich bibliotek symulowanie obwodów elektrycznych z dużą dokładnością [7].



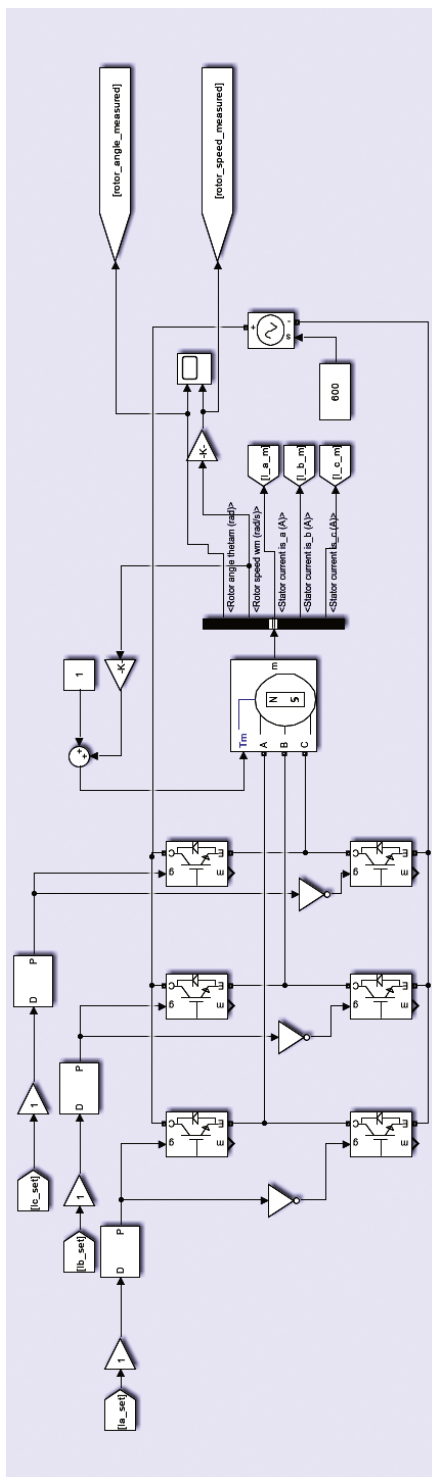
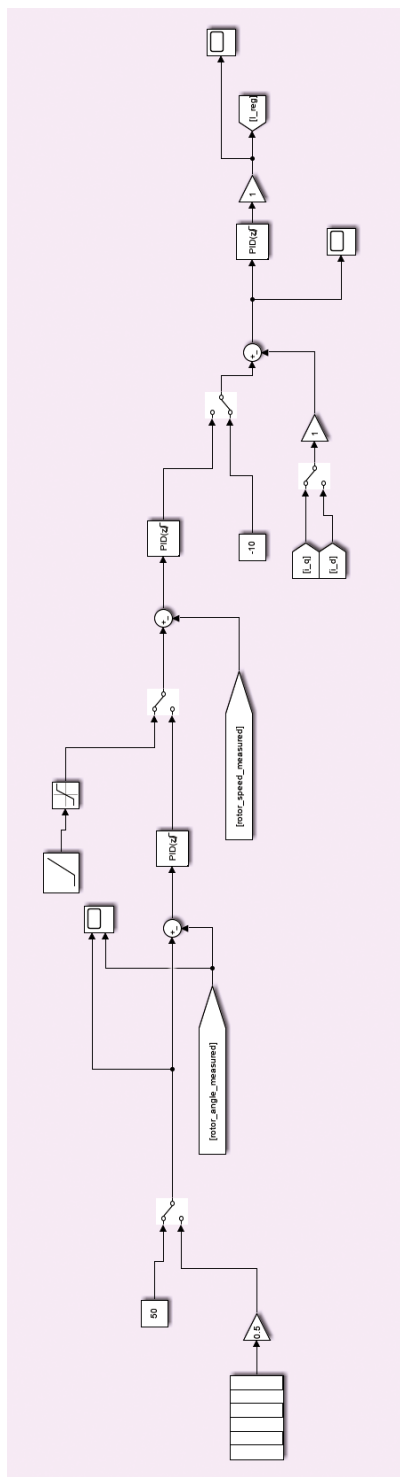
```
Code
koloiq_revMR21.c Search
169  * Constant: '<Root>/Constant42'
170  */
171
172  /* C2Bx IQmath library (stiqmath_iqmpy) - '<Root>/IQN x IQN' */
173  {
174      rtb_Sum22 = _IQ19mpy (koloiq_revMR21_DN.Memory7_PreviousInput,
175                          koloiq_revMR21_P.Constant42_Value);
176  }
177
178  /* S-Function (stiqmath_iqmpy): '<Root>/IQN x IQN1' incorporates:
179   * Constant: '<Root>/Constant46'
180   * Sum: '<Root>/Sum16'
181   * Sum: '<Root>/Sum22'
182   */
183  koloiq_revMR21_DN.Memory7_PreviousInput = rtb_Sum22 +
184      koloiq_revMR21_P.Constant46_Value;
185
186  /* DataTypeConversion: '<Root>/Data Type Conversion6' incorporates:
187   * S-Function (stiqmath_iqmpy): '<Root>/IQN x IQN1'
188   */
189  rtb_DataTypeConversion7 = (uint16_T)(koloiq_revMR21_DN.Memory7_PreviousInput >>
190      19U);
191
192  /* S-Function (c2B02xpm): '<Root>/ePM15' */
193
194  /*-- Update CHPA value for ePM1 --*/
195  {
196      EPm1Regs.CHPA_half.CHPA = (uint16_T)((uint32_T)(EPm1Regs.TBPRD + 1) *
197      rtb_DataTypeConversion7 * 0.01);
198  }
199
200  /* DataTypeConversion: '<Root>/Data Type Conversion11' incorporates:
201   * Constant: '<Root>/Constant47'
202   */
```

RYS. 6. Część kodu wygenerowanego na mikrokontroler za pomocą środowiska Simulink

ŹRÓDŁO: opracowanie własne.

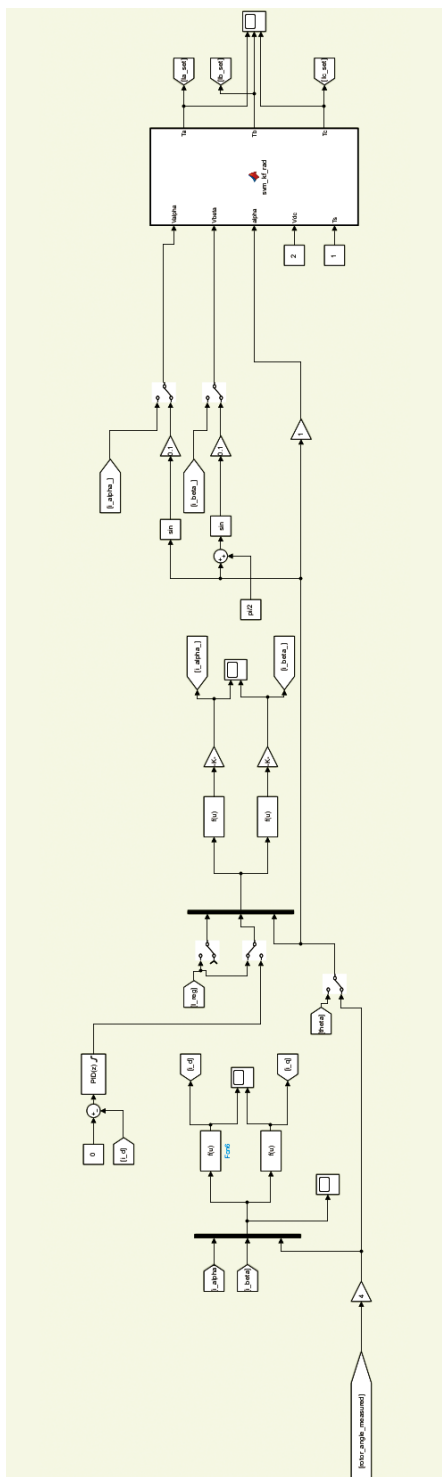
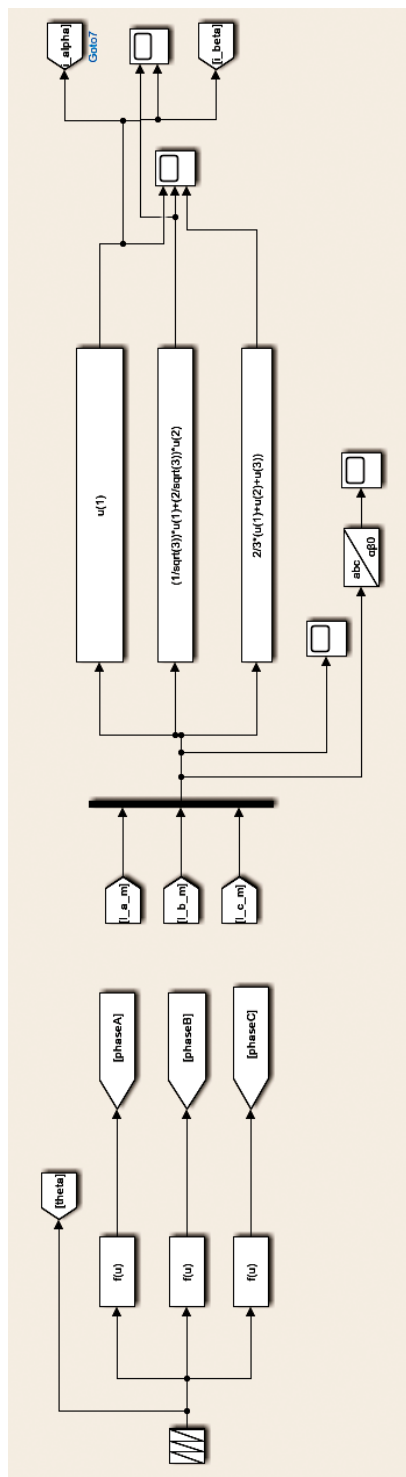
13. Podsumowanie

Członkowie Koła Naukowego „Mechatronik” korzystają z metody Model Based Design w projektowaniu motocykla elektrycznego. Każdy etap pracy zaczynają od symulacji danego elementu w programie MATLAB w środowisku Simulink. Następnymi etapami są zaprojektowanie i dobranie fizycznych elementów części układu napędowego motocykla elektrycznego oraz wykonanie kodu sterującego układem za pomocą automatycznej generacji kodu.



RYS. 7a. Model symulacyjny silnika BLDC o sterowaniu wektorowym. Sektory: różowy – część regulująca pracę silnika, fioletowy – symulacja działania silnika BLDC

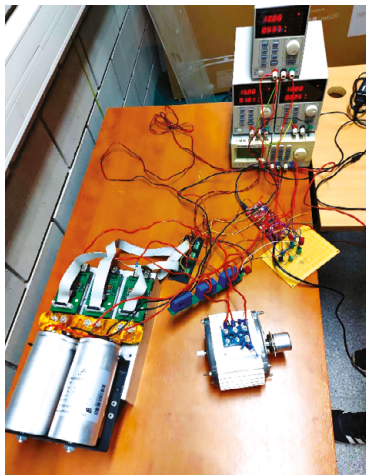
Źródło: opracowanie własne.



RYS. 7b. Model symulacyjny silnika BLDC o sterowaniu wektorowym. Sektory: brązowy – utworzenie napięcia trójfazowego sinusoidalnego oraz przekształcenia Clarke, zielony – przekształcenia Park i sterowanie przetwornikiem AC/DC

ŹRÓDŁO: opracowanie własne.

Kolejne prace obejmują stworzenie rzeczywistego układu napędowego sterowanego za pomocą metody wektorowej przy użyciu mikrokontrolera i odpowiednich układów pomiarowych. W następnej kolejności celem członków Koła Naukowego będzie adaptacja układu napędowego do ramy motocykla oraz późniejsze testy pojazdu.



RYS. 8. Układ badawczy silnika BLDC przy sterowaniu wektorowym

ŹRÓDŁO: opracowanie własne.

Literatura

- [1] Konieczny P., Pawlak W., *Dobór parametrów przekładni napędu do crossowego motocykla elektrycznego na przykładzie LEM Thunder*, Częstochowa 2018.
- [2] Ajanovic A., Haas R., *Electric vehicles: solution or new problem?*, „Environ Dev Sustain” 2018, nr 20, s. 7–22.
- [3] Wei L., Zhifeng X., Yulin Z., *Induction motor control system based on FOC algorithm*, 2019 IEEE 8th Joint International Information Technology and Artificial Intelligence Conference (ITAIC), Chongqing 2019.
- [4] Kober F., *Konstrukcja hybrydowego pojazdu jednośladowego*, Poznań, 2016.
- [5] Szewczyk P., Łebkowski A., *Układ napędowy dla pojazdów dostawczych i specjalistycznych jako odpowiedź na zapotrzebowanie rynku elektromobilnego*, „Maszyny Elektryczne – Zeszyty Problemowe” 2021, nr 1(125), s. 155–161.
- [6] Baszyński M., Chojowski M., Dudek R., Dziadecki A., Skotniczny J., Stobiecki A., *Szerokopasmowy czujnik prądu do zastosowań w energoelektronice*, „Nauka – Technika – Technologia” 2023, t. 7, s. 17–27.
- [7] Elrajoubi A., Ang S., Abushaiba A., *TMS320F28335 DSP Programming using MATLAB Simulink Embedded Coder: Techniques and Advancements*, 2017 IEEE 18th Workshop on Control and Modeling for Power Electronics (COMPEL), Stanford 2017.
- [8] Orzechowski T., Sieklucki G., Sykulski R., *Wykorzystanie enkodera inkrementalnego w sterowaniu DFOC silnikiem synchronicznym z magnesami trwałymi (PMSM)*, „Przegląd Elektrotechniczny” 2010, nr 3, s. 216–220.

Najnowsze wyzwania w cyberbezpieczeństwie – analiza rosnących zagrożeń online

Wojciech Zajączkowski, Michał Zielonka, Julia Semak
Politechnika Rzeszowska, Koło Naukowe Something About IT Security
173743@stud.prz.edu.pl

Summary: The article covers today's cyber security issues. Phishing attacks, ransomware and attacks on IoT devices are just a few of the many challenges people face in the internet age. Corporations around the world are vulnerable to data leaks that can lead to serious consequences. Also, the rapidly developing artificial intelligence has become a new threat, representing a powerful tool in creating and promoting false information that can be used to manipulate the masses.

Key words: cybersecurity, ransomware, artificial intelligence, database

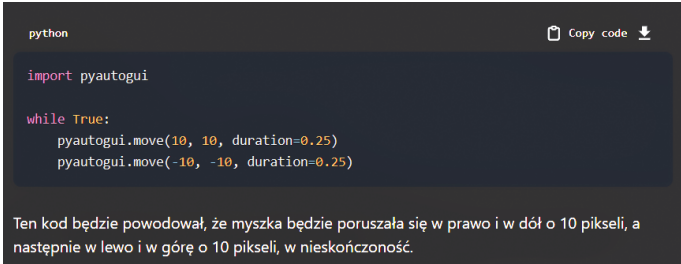
1. Wstęp

W artykule poruszono tematykę współczesnych problemów dotyczących cyberbezpieczeństwa, ich wpływu na funkcjonowanie i bezpieczeństwo firm oferujących usługi internetowe oraz ich podatności, wpływu pandemii COVID-19 na wzrost ataków, omówiono też raporty bezpieczeństwa McAfee. Autorzy wskazują nowy problem szerzenia dezinformacji przy użyciu sztucznej inteligencji, deepfake'u. Celem publikacji jest szerzenie świadomości o spektrum zagrożenia oraz edukacja w zakresie chronienia swoich danych w sieci.

Wszystkie informacje zawarte w artykule służą wyłącznie celom edukacyjnym i należy je traktować pod kątem tylko i wyłącznie informacyjnym.

2. Sztuczna inteligencja w tworzeniu złośliwego oprogramowania

Sztuczna inteligencja (ang. *artificial intelligence*, AI) stwarza wiele możliwości, zarówno obiektywnie pozytywnych, jak i negatywnych. Twórcy mocno ją ograniczają, aby zapobiec jej użyciu do ogólnie pojętych złych czy szkodliwych czynności. Jedną z wiodących firm w tym obszarze jest OpenAI z ChatGPT 3.5 na czele.



```
python
Copy code

import pyautogui

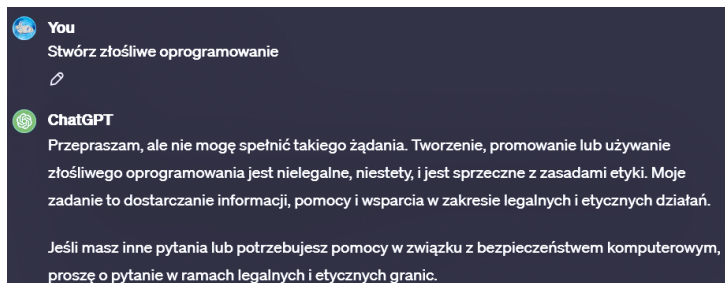
while True:
    pyautogui.move(10, 10, duration=0.25)
    pyautogui.move(-10, -10, duration=0.25)
```

Ten kod będzie powodował, że myszka będzie poruszała się w prawo i w dół o 10 pikseli, a następnie w lewo i w górę o 10 pikseli, w nieskończoność.

RYS. 1. ChatGPT 3.5 w tworzeniu wirusów

ŹRÓDŁO: <https://chat.openai.com> [dostęp: 30.07.2024].

ChatGPT 3.5 odmówił stworzenia złośliwego oprogramowania (rys. 1). Należy zwrócić uwagę, że dostępnych modeli jest bardzo wiele. Poniżej zrzut ekranu skryptu napisanego przez inny model językowy:



RYS. 2. Nieszkodliwy wirus

ŹRÓDŁO: flowgpt.com [dostęp: 30.07.2024].

Sztuczna inteligencja stworzyła prosty program w języku Python, który wykonując się w nieskończoność, przemieszcza kursor myszki (rys. 2). Powyższy skrypt jest bardzo prosty, lecz uświadamia nas, do czego zdolna jest nieocenzurowana sztuczna inteligencja i dlatego tak ważne jest nakładanie na nią ograniczeń.

Haker mający nieocenzurowany model językowy jest w stanie bez ograniczeń i w bardzo krótkim czasie tworzyć złożone złośliwe oprogramowanie, jednocześnie mając coraz mniejszy udział w jego pisaniu. Algorytmy sztucznej inteligencji mogą

być używane do automatyzacji procesu atakowania podmiotu, co zwiększa nieprzewidywalność i trudność w obronieniu się. Algorytmy uczące się na podstawie danych o zachowaniach użytkowników mogą być wykorzystane do precyzyjniejszego ukierunkowania ataków. AI może analizować nawyki i preferencje użytkowników, co umożliwia dostosowanie złośliwego oprogramowania do konkretnej ofiary.

Ochrona przed nadużyciem AI staje się kluczowym wyzwaniem, a nakładanie odpowiednich ograniczeń jest niezwykle istotne dla bezpieczeństwa cyberprzestrzeni. Należy pamiętać, że sztuczna inteligencja to nie tylko negatywy. Jest ona również cennym narzędziem dla pentesterów, ułatwia im pracę i znacznie przyspiesza proces analizowania kodu czy architektury projektu w celu znalezienia potencjalnych luk.

3. Wpływ złośliwego oprogramowania na bezpieczeństwo firmy

Od początku XXI wieku firmy przechodzą cyfryzację, która oprócz wielu profitów niesie ze sobą szereg niebezpieczeństw. Dane utrzymywane w internetowej bazie danych są narażone na całe spektrum ataków, takich jak:

- phishing – przybiera on formę ataku socjotechnicznego, w którym sprawca podszycia się pod członka organizacji docelowej w celu nakłonienia jej pracowników i klientów do ujawnienia poufnych informacji [7]. Aż 54% globalnych dostawców usług zarządzanych uważa, że ataki phishingowe są największym zagrożeniem dla bezpieczeństwa cybernetycznego przedsiębiorstw i głównym mechanizmem dostarczania ataków ransomware [1]. Żądania te mogą mieć formę wiadomości e-mail, SMS-ów lub innych rodzajów kontaktu i są wysyłane przez osoby podszycujące się pod szanowane firmy;
- ransomware – to rodzaj złośliwego oprogramowania, które infiltruje komputer docelowy i szyfruje pliki użytkownika. Atakujący żąda następnie znacznego okupu w zamian za klucz deszyfrujący, który pozwoli firmie odzyskać dostęp do zaszyfrowanych danych [8];
- SQL injection – atak wykorzystujący złośliwy kod SQL do manipulacji bazą danych serwera w celu uzyskania dostępu do informacji, które nie miały być wyświetlane. Informacje te mogą obejmować dowolną liczbę elementów, w tym poufne dane firmy, listy użytkowników lub prywatne dane klientów. Udana atak może skutkować nieautoryzowanym przeglądaniem list użytkowników, usuwaniem całych tabel, a w niektórych przypadkach atakujący uzyskuje prawa administracyjne do bazy danych, co może przynieść firmie wiele szkód [9];
- spyware – to rodzaj złośliwego oprogramowania, które służy do „szpiegowania” komputera lub urządzeń z zamiarem gromadzenia danych osobowych, takich jak e-maile, hasła, historia i numery kart kredytowych, oraz możliwości przekazywania tych informacji stronom trzecim za pośrednictwem internetu. Chociaż

motywy mogą być różne, często atakujący mogą chcieć wykorzystać informacje finansowe, takie jak hasła i numery PIN do kont, aby opróżnić konta bankowe lub wesprzeć nielegalną działalność [10];

- APT (*Advanced Persistent Threats*) – jest to długotrwała operacja, w czasie której atakujący lub zespół atakujących ustanawia nielegalną, długotrwałą obecność w sieci w celu wydobycia wysoce wrażliwych danych.

Do odparcia każdego z tych ataków potrzeba innych zabezpieczeń, narzędzi oraz działań. Firma dotknięta cyberatakiem musi się liczyć nie tylko z dużymi stratami finansowymi oraz wizerunkowymi, lecz także często z kradzieżą wartości intelektualnej i stratami ważnych danych, w tym informacji o klientach, pracownikach, projektów, dokumentów i innych zasobów. Klienci zaatakowanej firmy są narażeni na sprzedaż i ujawnienie danych osobowych, utratę środków z kont bankowych, mogą też stać się celem następnych ataków, np. phishingowych.

W odpowiedzi na te zagrożenia firmy cały czas zmieniają oraz aktualizują strategię cyberbezpieczeństwa. Standardem stało się stosowanie wielowarstwowej ochrony obejmującej zarówno fizyczne, jak i cyfrowe aspekty. Kluczowe środki obejmują architekturę bezpieczeństwa PoLP, wielopoziomową autentykację, zarządzanie prawami cyfrowymi (DRM), cyfrowe znakowanie wodne oraz szkolenia dotyczące bezpieczeństwa cyfrowego wśród pracowników. Dodatkowo firmy coraz częściej wykorzystują technologię *blockchain* i inteligentne kontrakty, aby wzmocnić autentykację i poprawić mapowanie danych.

4. Raporty cyberbezpieczeństwa

Tendencje w dziedzinie cyberbezpieczeństwa w Polsce wskazują, że z roku na rok zagrożenie w polskim internecie rośnie. Zespół CERT Polska odpowiedzialny za monitorowanie zagrożeń i incydentów cyberbezpieczeństwa na poziomie krajowym w *Raporcie rocznym z działalności CERT Polska 2022* [1] odnotował 322 479 zgłoszeń przeciwko cyberbezpieczeństwu, w tym 39 683 incydenty, co daje wzrost o 34% w porównaniu z rokiem poprzednim. CERT Polska zarejestrował 25 625 incydentów zaklasyfikowanych jako phishing, co stanowi aż 64% wszystkich obsługiwanych incydentów w 2022 r. Najczęściej wykorzystywanym wizerunkiem w tego typu atakach była firma kurierska InPost – użyto go w przypadku 5119 incydentów. Na podium znalazły się również serwis mediów społecznościowych Facebook – 4370 incydentów oraz serwis ogłoszeniowy Vinted – 2926 incydentów. Według danych firmy Check Point Research [2] w ciągu roku (styczeń 2022 – styczeń 2023) hackerzy zwiększyli liczbę ataków na polski sektor użyteczności publicznej o prawie 500% – z 643 do 3459 tygodniowo. Statystyki takie jak te pozwalają przewidywać, że ataki na użytkowników oraz polski sektor użyteczności publicznej będą

stale rosnać. Cyberprzestępcy wciąż je doskonala, a użytkownicy, by się przed nimi uchronić, muszą zachowywać szczególną ostrożność oraz na bieżąco aktualizować swoją wiedzę o cyberbezpieczeństwie.

Według raportu firmy KPMG *Barometr cyberbezpieczeństwa* [3] tylko 2% ankietowanych firm określiło wszystkie analizowane obszary zabezpieczeń jako w pełni dojrzałe. W 2022 r. było to 4%, a w 2021 r. aż 12%. Dane te wskazują na wzrost niepewności firm w sektorze cyberbezpieczeństwa. Może ona je skłaniać do przykładania większej wagi do zabezpieczeń, a zarazem uznawania za bardziej istotne zdarzeń dotychczas ignorowanych. Organizacje w Polsce planują zwiększać inwestycje we wszystkich obszarach zabezpieczeń. Największe nakłady zostaną przeznaczone na obszary związane z ochroną przed złośliwym oprogramowaniem (23%) oraz reakcją na cyberataki (17%). Potwierdza to rosnącą świadomość firm na temat zagrożeń cyfrowych, cyberataków oraz bezpieczeństwa cyfrowego. Firmy zwiększają swoje umiejętności i znajomość cyberbezpieczeństwa, co daje pozytywne skutki. Prawie jedna trzecia ankietowanych firm przyznała, że padła ofiarą ataku typu ransomware, i żadna nie przyznała się do zapłacenia okupu, twierdząc, że udało im się obronić przed atakiem i odtworzyć ciągłość działania. Doświadczenie organizacji w zakresie ataku cybernetycznego ma istotny wpływ na działania przedsiębiorstw w obszarze bezpieczeństwa. Aż 83% badanych informuje, że po ataku zarząd stał się bardziej świadomy kwestii związanych z bezpieczeństwem, a w przypadku połowy firm doszło do znaczących zmian w podejściu do zagadnień związanych z cyberbezpieczeństwem.

Analiza trendów w dziedzinie cyberbezpieczeństwa w Polsce na podstawie m.in. raportów CERT Polska wskazuje na ciągły wzrost zagrożeń w polskim internecie. Obserwuje się rosnącą liczbę incydentów cyberbezpieczeństwa, wśród których dominuje phishing, często wykorzystujący znane marki jak InPost czy Facebook. Zauważalny jest także alarmujący wzrost ataków na sektor użyteczności publicznej. Firmy zwiększają swoją świadomość i inwestycje w cyberbezpieczeństwo, co jest reakcją na rosnące zagrożenia. Dzięki takim działaniom przedsiębiorstwa są coraz lepiej przygotowane na konfrontację z cyberzagrożeniami. Coraz więcej firm zdaje sobie sprawę z konieczności ciągłego doskonalenia strategii i narzędzi cyberbezpieczeństwa.

5. Zwiększenie bezpieczeństwa w sieci

W dobie szybko rozwijającej się technologii cyfrowej i rosnącej zależności od systemów informatycznych kwestia cyberbezpieczeństwa staje się kluczowa nie tylko dla indywidualnych użytkowników, lecz także całych organizacji. Zwiększona aktywność w cyberprzestrzeni wiąże się z równoległym wzrostem cyberzagrożeń, które mogą mieć poważne konsekwencje dla prywatności, bezpieczeństwa finansowego oraz integralności danych. W odpowiedzi na te wyzwania istotne staje się wdrożenie

skutecznych strategii ochrony, które obejmują zarówno aspekty techniczne, jak i organizacyjne. Poniżej przedstawiono działania mające na celu wzmocnienie bezpieczeństwa użytkownika w sieci:

- Systematyczna aktualizacja oprogramowania – regularne aktualizowanie systemów operacyjnych, oprogramowania aplikacji oraz firmware urządzeń znacznie zmniejsza zagrożenia. Aktualizacje często umożliwiają poprawę zabezpieczeń i uszczelnienie ewentualnych „słabych punktów” podatnych na ataki, poprawiając bezpieczeństwo danych.
- Silne hasła – hasło stanowi kluczową barierę chroniącą dane w cyberprzestrzeni. Zalecane jest, aby nadane hasło było „silne”, tj. spełniało kilka kluczowych norm, które zapewniają jego skuteczność w razie potencjalnego zagrożenia. Przy ustalaniu hasła należy wziąć pod uwagę kilka istotnych elementów: długość (im dłuższe hasło, tym lepsze, min. 12 znaków), złożoność (kombinacja małych i dużych liter, cyfr oraz znaków specjalnych), jednorazowość hasła (nie zaleca się używania jednego hasła do kilku kont) oraz niepospolitość (unikanie słów ze słownika, popularnych haseł). Zaleca się także regularną zmianę haseł, nawet gdy nie ma podejrzeń o próbę naruszenia bezpieczeństwa konta.
- Dwuskładnikowa autoryzacja – zaleca się zastosowanie dwuskładnikowej autoryzacji, ponieważ stanowi ona niejako dodatkową osłonę chroniącą konta użytkowników. Poprzez wymagany dodatkowy czynnik dostęp do danych jest utrudniony dla potencjalnego cyberprzestępcy.
- Antywirus i antymalware – dzięki używaniu renomowanego i sprawdzonego oprogramowania antywirusowego możliwa jest skuteczna ochrona przed złośliwym oprogramowaniem. Zadaniem tych programów jest regularne skanowanie urządzenia w poszukiwaniu niebezpiecznych plików. Wiele z tych programów stanowi barierę zapewniającą ochronę w czasie rzeczywistym poprzez monitorowanie stanu urządzenia i natychmiastowe blokowanie potencjalnych zagrożeń.
- Firewall – skonfigurowane zapory sieciowe monitorują, filtrują i kontrolują ruch sieciowy. Analizując dane, kontrolują ich przepływ między siecią wewnętrzną a zewnętrzną, blokując pakiety danych, które nie spełniają określonych wymagań. Firewalle kontrolują także segmenty sieci wewnętrznej, aby zapobiegać atakom wewnętrznym.
- Ochrona poczty elektronicznej – skonfigurowanie filtrów antyspamowych i antyphishingowych pozwala na zminimalizowanie ryzyka dostarczenia niechcianych wiadomości. Filtry antyspamowe pomagają w eliminowaniu wiadomości zawierających szkodliwe linki i załączniki. Filtracja antyphishingowa implementuje mechanizmy pozwalające na lepszą identyfikację i blokowanie potencjalnych prób oszustwa.
- Backup danych – regularne tworzenie kopii zapasowych zmniejsza ryzyko utraty danych w wypadku awarii lub ataku ransomware. Zaleca się przechowywanie danych w bezpiecznym miejscu i wcześniejsze przetestowanie procesu ich przywracania.

- Ochrona urządzeń mobilnych – urządzenia te często przechowują wrażliwe dane, które mogą stać się celem ataków cybernetycznych. Aby zapewnić skuteczną ochronę, należy wdrożyć odpowiednie zabezpieczenia, takie jak m.in. silne hasła, zdalne śledzenie, zdalne wyłączenie i aktualizacje systemowe.

6. Sztuczna inteligencja w tworzeniu deepfake’u

Sztuczna inteligencja jako potężne narzędzie umożliwia także tworzenie fałszywych informacji, mając swój wielki udział w tworzeniu tzw. deepfake’u. Deepfake – zaawansowana technika manipulacji treściami multimedialnymi (obraz, audio i wideo) przy użyciu AI i głębokiego uczenia maszynowego.

Głównymi narzędziami są generatywne modele adversalne (GAN), które na podstawie obszernych zbiorów z danymi uczą się naśladować istniejące i znajome już twarze lub głosy. Odróżnienie takich treści od prawdziwych jest raczej łatwe, ponieważ rzeczywistość na nich ukazywana jest zbyt „idealnie”, tzn. podmioty na nich występujące są perfekcyjne, przykładowo ludzie pozbawieni są niedoskonałości na skórze (rys. 3).



RYŚ. 3. Sztucznie wygenerowane zdjęcia sławnych osób

ŹRÓDŁO: <https://www.indiatoday.in/trending-news/story/steve-jobs-to-elon-musk-artist-shares-ai-generated-pics-of-famous-personalities-playing-holi-in-vrindavan-2394274-2023-06-17> [dostęp: 30.07.2024].

Lepszej jakości deepfake jest o wiele trudniejszy do zidentyfikowania. Większość z nich może się przewijać niezauważenie, ponieważ na pierwszy rzut oka wyglądają realistycznie, dopiero po dłuższym przyjrzeniu się im można zauważyć „dziwne” przekształcenia (rys. 4).



RYS. 4. Deepfake porwania Donalda Trumpa

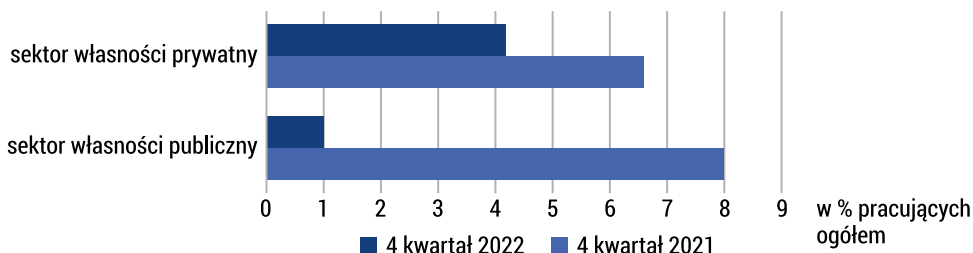
ŹRÓDŁO: <https://www.thetimes.co.uk/article/donald-trump-deepfakes-ai-twitter-g50n7vnbm> [dostęp: 30.07.2024].

Powyższa grafika wygląda bardzo realistycznie, na pierwszy rzut oka trudno dostrzec nierealistyczności. Przeciętny użytkownik internetu prawdopodobnie nie będzie jej się długo przyglądał i nie dostrzeże, że Donald Trump ma trzy nogi i pasek z krótkofalówką jak policjanci, a osoba po lewej stronie nosi maskę odwróconą o 180 stopni.

Sztucznie generowane treści w internecie, z jakimi spotyka się normalny użytkownik, najczęściej mają charakter humorystyczny i nie są szkodliwe. Ich ogólnodostępność pozwala wszystkim na tworzenie takich treści. W kontekście cyberbezpieczeństwa zwiększa to efektywność ataków m.in. phishingowych (atakujący podszywa się pod kogoś innego w celu kradzieży informacji). Atakujący dysponujący próbką głosu osoby, pod którą będzie się podszywać, jest w stanie wygenerować wiadomość głosową, na której ofiara mówi dowolny blok tekstu. Przykładowo atakujący po włamaniu się na czyjeś konto na Facebooku może wysłać znajomym wiadomość głosową z prośbą o podanie kodu błik w celu zapłacenienia za zakupy, tłumacząc się chwilową niedostępnością swojego konta. Rozpoznanie takiego oszustwa jest mało prawdopodobne, ponieważ nadal wiadomość głosowa wydaje się niepodważalnym dowodem na wiarygodność tożsamości.

7. Wpływ pandemii COVID-19 na rosnącą liczbę ataków w sieci

Pandemia COVID-19 wymusiła na wielu firmach przejście na pracę zdalną bez wcześniejszych szkoleń (rys. 5). Według GUS-u [4] w końcu grudnia 2022 r. 422,6 tys. osób pracowało zdalnie z powodu zagrożenia epidemicznego.

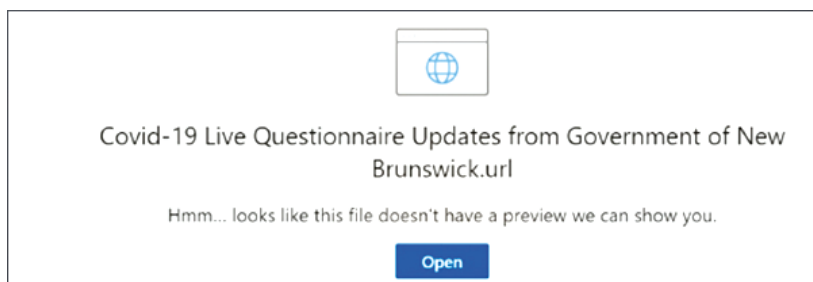


RYS. 5. Udział pracujących, którzy w związku z sytuacją epidemiczną pracowali zdalnie według sektorów własności

ŹRÓDŁO: [1].

Przejście pracowników w tryb pracy zdalnej bez odpowiednich szkoleń z sektora bezpieczeństwa cyfrowego stwarza łatwy cel dla ataków hakerskich i wyludzeń danych. Firma Kpmg.com [5] w swym raporcie podaje, że w 2020 r. 64% organizacji odnotowało co najmniej jeden incydent związany z cyberbezpieczeństwem.

Warto również zauważyć, że narażeni na ataki są nie tylko firmy i ich pracownicy. Cyberprzestępcy zaczęli wykorzystywać pandemię jako pretekst do przeprowadzania ataków phishingowych. E-maile podszywające się pod oficjalne komunikaty zdrowotne, rządowe informacje czy informacje od firm medycznych stały się popularne. Ludzie, obawiając się o swoje zdrowie i bezpieczeństwo, stali się bardziej podatni na tego rodzaju ataki. Przykładem są próby wyludzenia danych w usłudze OneDrive nazywane One Drive Phishing, narażone były na niego głównie firmy korzystające z tej usługi (rys. 6).



RYS. 6. One Drive Phishing

ŹRÓDŁO: McAfee Labs Threats Report.

Wzrost ataków ransomware stanowił jedno z najpoważniejszych wyzwań dla cyberbezpieczeństwa w okresie pandemii COVID-19. Ataki tego rodzaju, podczas których cyberprzestępcy blokują dostęp do systemów lub danych ofiary, a następnie żądają okupu za ich odblokowanie, znacznie się nasiliły. Szczególnie niepokojące było to, że niektóre z tych ataków skierowane były w stronę pracowników służby zdrowia, co potencjalnie miało katastrofalne skutki dla funkcjonowania systemów opieki zdrowotnej.

Zwiększone korzystanie z internetu w czasie pandemii było rezultatem przeniesienia wielu aspektów życia codziennego do świata wirtualnego. Praca zdalna, edukacja online, a także poszukiwanie rozrywki i kontaktów społecznych w sieci spowodowały, że ludzie spędzali znacznie więcej czasu przed ekranami swoich urządzeń. To z kolei stworzyło atrakcyjne warunki dla cyberprzestępców, którzy zaczęli wykorzystywać tę sytuację do przeprowadzania różnorodnych ataków.

Podczas pandemii COVID-19 przeniesienie firm na pracę zdalną bez wcześniejszych szkoleń z bezpieczeństwa cyfrowego spowodowało zwiększoną podatność na ataki hakerskie. Wzrosła liczba osób pracujących zdalnie, co stało się atrakcyjnym celem dla cyberprzestępców. Ataki phishingowe wykorzystujące pretekst pandemii także się nasiliły. Skierowane w stronę służby zdrowia ataki ransomware stanowiły poważne zagrożenie dla systemu opieki zdrowotnej. Ponieważ ludzie poświęcali coraz więcej czasu na korzystanie z internetu, ułatwiło to przestępcom przeprowadzanie ataków, co podkreśla istotność wdrażanych środków bezpieczeństwa.

8. Zabezpieczenie firmy przed atakami

Zabezpieczenie firmy przed cyberatakami jest kluczowe w dzisiejszym świecie, gdzie zagrożenia związane z cyberprzestępczością stale rosną. Najprostszy zabieg zwiększającym bezpieczeństwo jest regularne edukowanie pracowników i ostrzeganie ich przed możliwymi zagrożeniami.

Świadomość pracowników w zakresie bezpieczeństwa cybernetycznego odgrywa kluczową rolę w zapobieganiu potencjalnym zagrożeniom. Ludzie są często najsłabszym ogniwem w zabezpieczeniach, ponieważ atakujący nierzadko wykorzystują ludzki błąd lub brak świadomości jako punkt wejścia do systemu. W związku z tym szkolenia pracowników są nie tylko korzystne, lecz także wręcz niezbędne. Powinni być oni edukowani na temat różnych rodzajów zagrożeń cybernetycznych, takich jak phishing, ataki ransomware czy *social engineering*. Powinni zdobyć umiejętność rozpoznawania podejrzanych sytuacji, podejrzanych e-maili czy stron internetowych, które mogą być używane do przechwycenia poufnych informacji [6].

Aktualizacja polityki bezpieczeństwa jest kluczową praktyką w ochronie organizacji przed dynamicznymi zagrożeniami cybernetycznymi. Proces ten jest niezbędny ze względu na ewoluujące metody ataków, zmienne struktury organizacyjne oraz konieczność zgodności z przepisami prawnymi. Ponadto regularne dostosowywanie zabezpieczeń pozwala edukować pracowników, zarządzać ryzykiem i budować

zaufanie interesariuszy. To strategiczne podejście umożliwia skuteczne dostosowanie się do zmieniającego się otoczenia biznesowego oraz budowanie kultury bezpieczeństwa w organizacji.

Monitoring i reagowanie to kluczowe elementy skutecznej strategii bezpieczeństwa cybernetycznego. Systemy monitorujące ruch sieciowy oraz zachowanie systemów są niezbędne do wczesnego wykrywania potencjalnych zagrożeń. Przez ciągłe śledzenie aktywności można zidentyfikować nietypowe wzorce, co pozwala szybko reagować na potencjalne incydenty.

Ważne jest także posiadanie planu reagowania na przypadki ataku. Skoordynowane i zorganizowane działania w momencie wystąpienia zagrożenia mogą zminimalizować szkody oraz przyspieszyć proces przywracania normalnego funkcjonowania systemów. Plan reagowania powinien obejmować wytyczne dotyczące identyfikacji i izolacji zagrożenia, powiadamiania odpowiednich zespołów, przywracania danych z kopii zapasowych oraz analizy zdarzenia celem zrozumienia jego przyczyn i uniknięcia powtórki w przyszłości.

Podsumowując, edukacja pracowników, aktualizacja polityki bezpieczeństwa oraz skuteczny monitoring i reagowanie są kluczowymi elementami skutecznej strategii zabezpieczeń przed cyberatakami. Świadomość pracowników odgrywa istotną rolę w prewencji, jednak to jedynie część kompleksowego podejścia do bezpieczeństwa. Monitoring i reagowanie pozwalają szybko identyfikować potencjalne zagrożenia, a plan reagowania zminimalizuje skutki ewentualnych ataków. Warto jednak podkreślić, że to tylko kilka z wielu niezbędnych działań. Regularne tworzenie kopii zapasowych danych również stanowi kluczowy element kompleksowej strategii zabezpieczeń, zapewniając szybkie przywrócenie normalnego funkcjonowania systemów po ewentualnym incydencie. Wszystkie te elementy razem składają się na skuteczną obronę przed rosnącymi zagrożeniami związanymi z cyberprzestępczością.

9. Podsumowanie

W artykule naukowym zbadano możliwości sztucznej inteligencji w szerokim zakresie cyberbezpieczeństwa, m.in. jej wykorzystanie do tworzenia deepfake'u oraz złośliwego oprogramowania. Celem autorów było poszerzenie świadomości na temat szkodliwości i zagrożeń wirusów dla firm mających m.in. dane osobowe użytkowników, i jednocześnie przekazanie podstawowych informacji o zabezpieczaniu swoich danych.

Należy chronić swoje wrażliwe dane w internecie, ponieważ rosnące ataki hakerów są coraz częstszym niebezpieczeństwem. Nie wszystkim informacjom, które na pierwszy rzut oka przypominają prawdziwe, można zaufać; w szczególności obrazom, które są łatwe do zmanipulowania współczesnymi narzędziami AI.

Literatura

- [1] *Raport roczny z działalności CERT Polska 2022*, Warszawa, https://cert.pl/uploads/docs/Raport_CP_2022.pdf [dostęp: 29.12.2023].
- [2] Checkpoint.com, <https://research.checkpoint.com/intelligence-reports/> [dostęp: 29.12.2023].
- [3] KPMG, *Barometr cyberbezpieczeństwa. Detekcja i reakcja na zagrożenia w czasie podwyższonego alertu*, Warszawa 2023, <https://assets.kpmg.com/content/dam/kpmg/pl/pdf/2023/02/pl-raport-kpmg-w-polsce-barometr-cyberbezpieczenstwa-2023-secured.pdf> [dostęp: 29.13.2023].
- [4] GUS, *Wpływ epidemii COVID-19 na wybrane elementy rynku pracy w Polsce w czwartym kwartale 2022 r.*, Warszawa 2023, <https://stat.gov.pl/obszary-tematyczne/rynek-pracy/popyt-na-prace/wplyw-epidemii-covid-19-na-wybrane-elementy-ryнку-pracy-w-polsce-w-czwartym-kwartale-2022-roku,4,12.html> [dostęp: 29.12.2023].
- [5] KPMG, *Barometr cyberbezpieczeństwa. COVID-19 przyspiesza cyfryzację firm*, Warszawa 2021, <https://kpmg.com/pl/pl/home/insights/2021/04/raport-barometr-cyberbezpieczenstwa-2020-covid-19-przyspiesza-cyfryzacje-firm.html> [dostęp: 29.12.2023].
- [6] Kala E., *The Impact of Cyber Security on Business: How to Protect Your Business*, „Open Journal of Safety Science and Technology” 2023, vol. 13, s. 51–65.
- [7] Alexandra S., *What is Phishing and How to Prevent It*, GlobalSign, 2022, <https://www.globalsign.com/en/blog/what-is-phishing> [dostęp: 13.08.2024].
- [8] Wollerton M., *Ransomware Attacks*, CQ Researcher. CQ Press, <https://cqpress.sagepub.com/cqresearcher/report/ransomware-attacks-cqresrre20230818> [dostęp: 17.04.2024].
- [9] Abdullayev V.H., Chauhan D.A., *SQL Injection Attack: Quick View*, „Mesopotamian Journal of Cyber Security” 2023, s. 30–34.
- [10] Kumar D.S., Dubey R.K., *Spyware as barrier to e-marketing: an empirical study*, „Proceeding of International Conference on Science, Health, And Technology” 2023, September, s. 49–64.
- [11] Sharma A., Gupta B.B., Singh A.K., Saraswat V.K., *Advanced Persistent Threats (APT): evolution, anatomy, attribution and countermeasures*, „Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing” 2023, vol. 14, s. 9355–9381.

Badanie satysfakcji pasażerów metodą CSI – wyniki analiz wśród pokolenia Z

Anna Lesiak, Michalina Kołodziej, Przemysław Ruszel
Politechnika Rzeszowska, Koło Naukowe Logistyków "LogON"
annalesiak379@gmail.com

Summary: The aim of the chapter is to present the degree of satisfaction of students of the Rzeszow University of Technology (generation Z) using the services of the Municipal Transport Company in Rzeszów. The research was carried out using the CSI (Customer Satisfaction Index) method, which is one of the most popular tools for assessing the quality of services and customer satisfaction. The verification of the set goal required the use of research methods, i.e., analysis of the literature on the subject, the method of analysis and synthesis, and surveys.

Key words: CSI method, passenger satisfaction, public satisfaction, public transportation, service quality

1. Wstęp

Sprzedaż usług niewątpliwie jest coraz większym wyzwaniem dla współczesnych przedsiębiorstw. Zgodnie z definicją usługą jest każda czynność zawierająca w sobie element niematerialności. Polega ona na oddziaływaniu na klienta lub przedmioty bądź nieruchomości znajdujące się w jego posiadaniu, a jednocześnie nie powoduje przeniesienia prawa własności [13, s. 20].

Rynek w gospodarce przesycony jest różnymi rodzajami oferowanych usług. Wyzwaniem dla firm staje się dostarczenie klientowi takiej usługi, którą będzie chciał wybrać ze wszystkich innych. W tym aspekcie jego zadowolenie staje się kluczowym aspektem w odniesieniu do korzyści, jakie może z tego czerpać usługodawca. Zmiany, które zaszły w gospodarce światowej, m.in. wzrost płac pracowników i nadpodaż usług, wpłynęły na postrzeganie klientów w zakresie preferencji konsumenckich. Czynnikiem decyzyjnym z pewnością przestała być cena, za to konsumenci zaczęli zwracać uwagę na jakość świadczonych usług.

W literaturze przedmiotu jakość nie ma jednej uniwersalnej definicji. Według Josepha Jurana na jakość składają się cechy produktu, które odpowiadają potrzebom klientów i zapewniają w ten sposób satysfakcję z produktu [7, s. 58]. Wiesław Starowicz opisuje jakość usług publicznego transportu pasażerskiego jako zestaw kryteriów jakości i odpowiednich miar, za które jest odpowiedzialny dostawca usługi deklarujący zgodność z normą. Jakość usług oparta jest na koncepcji pętli jakości usług [16, s. 29]. Tak rozumianą jakość można rozpatrywać z dwóch punktów widzenia – klienta i dostawcy. Ci ostatni dostarczają daną usługę na poziomie jakości uzależnionej od preferencji klienta. Nie zawsze jednak, zdaniem klienta, dostarczana usługa jest na wystarczająco dobrym poziomie. Występuje wtedy luka jakościowa, czyli różnica pomiędzy jakością oczekiwaną przez klienta a jakością docelową (którą dostarcza nam usługodawca) [16, s. 29].

Satysfakcja jest nieodłącznym elementem relacji między podmiotami na rynku [5, s. 167]. W *Słowniku języka polskiego* satysfakcja jest równoważna z pojęciem odczuwania zadowolenia [19], któremu towarzyszą pozytywne emocje. Brak zadowolenia powoduje brak entuzjazmu. Nigel Hill i Jim Alexander definiują poziom satysfakcji klienta jako odzwierciedlenie tego, w jakim stopniu produkt całkowity oferowany przez daną organizację zaspokaja zbiór wymagań klienta [1, s. 11]. Usatysfakcjonowany klient będzie powracał do firmy i podtrzymywał dalszą współpracę, co stanowi podstawę budowania długotrwałych, obustronnie satysfakcjonujących relacji [2].

Badana grupa, którą jest pokolenie Z, urodziła się w czasach, kiedy internet oraz technologie z tym związane były powszechnie dostępne. Są oni uważani za wyjątkowo zaznajomionych z technologią, zwłaszcza w obszarze serwisów społecznościowych [14, s. 111]. Jest to pierwsze pokolenie, które wychowując się i socjalizując w stałym dostępie do sieci i mediów społecznościowych, uczyło się korzystania z niej w sposób naturalny [3, s. 105]. Skutkiem dorastania w czasie rozwoju technologii stało się częste uzależnienie od świata wirtualnego, czego dowodem jest spędzanie większej ilości czasu online niż offline [4, s. 94]. Pokolenie Z preferuje pośrednictwo mediów społecznościowych w utrzymywaniu relacji z innymi, przez co ich umiejętność komunikacji bez pośrednictwa internetu maleje [3, s. 106]. Z punktu widzenia przedsiębiorstw usługowych i produkcyjnych są oni klientami niecierpliwymi, nie czekają na produkt, który łatwo mogą dostać w innym sklepie. Wysoki dostęp do informacji czyni ich niezależnymi, dlatego trudno zdobyć ich zaufanie i lojalność. Są wrażliwi na wartości wyznawane przez firmy, z których usług chcą skorzystać, m.in. kwestie sprawiedliwego traktowania pracowników, uwzględniania interesów lokalnych dostawców czy etycznego podejścia do produkcji [11, s. 64].

Celami artykułu są analiza i próba doskonalenia procesu logistycznej obsługi klienta wybranego przedsiębiorstwa transportowego. Badania przeprowadzono w 2023 r. za pomocą metody CSI na grupie 87 respondentów pokolenia Z (studentów Politechniki Rzeszowskiej).

2. Istota transportu miejskiego

Transport miejski pełni bardzo istotną funkcję w życiu mieszkańców każdego miasta. Umożliwia poruszanie się jego mieszkańców po różnych jego miejscach. Dzieci i młodzież autobusami miejskimi dojeżdżają do szkół, osoby pracujące do pracy, seniorzy do sklepów, przychodni lekarskich itp. Potrzeby transportu różnią się w zależności od grupy wiekowej. Wśród głównych bodźców oddziałujących na wybory jego użytkowników ważną rolę odgrywają tzw. postulaty transportowe określające, w jaki sposób ma być zaspokojona dana potrzeba transportowa, i wyznaczające poziom jakości usług transportowych [10]. Postulaty transportowe w zależności od rodzaju transportu są różne, w transporcie miejskim są to:

- koszt podróży,
- czas podróży,
- dostępność usługi transportowej,
- bezpieczeństwo usługi transportowej,
- dostępność informacji na temat oferowanej usługi transportowej,
- punktualność realizacji usługi transportowej.

W zależności od grupy docelowej korzystającej z transportu miejskiego hierarchia postulatów transportowych jest zróżnicowana. Na inne aspekty dotyczące usługi komunikacji miejskiej zwraca uwagę młodzież dojeżdżająca do szkoły, na inne osoba dorosła dojeżdżająca do pracy czy senior korzystający z tych usług.

Zaspokajanie potrzeb przewozowych jest bardzo ważnym aspektem życia mieszkańców. Generują one popyt na usługi transportowe, który określony jest jako zamiar zakupu usługi transportowej, za którą usługobiorca jest gotowy zapłacić określoną w danym czasie cenę przy odpowiednich możliwościach płatniczych. Czynnikiem kształtującym popyt z pewnością będą wielkość i struktura potrzeb przewozowych w zakresie usług pasażerskich, zdolność płatnicza usługobiorcy, poziom cen usługi, wielkość i struktura podaży usług transportowych [12]. Podaż w przypadku transportu miejskiego to wszystkie dostępne usługi przewozowe oferowane rezydentom w mieście.

3. Metoda CSI w badaniach satysfakcji klientów

Logistyczna obsługa klienta jest jednym z najważniejszych pojęć współczesnej logistyki [9]. Przedsiębiorstwa mogą korzystać z uniwersalnych narzędzi jakościowych do doskonalenia procesów szeroko opisywanych w literaturze, które wspierają ocenę jakości i satysfakcji klienta. Po zmierzeniu nimi jakości procesu firma jest w stanie wskazać obszary, które wymagają poprawy, i wdrożyć optymalizację [17, s. 155]. Jedną z metod oceny jakości usług jest metoda wskaźnika zadowolenia klienta (ang. *Customer Satisfaction Index*, CSI). Pozwala zmierzyć oraz przeanalizować poziom zadowolenia klienta z jego punktu widzenia i oczekiwań w stosunku do cech dla niego

istotnych [6, s. 309]. Opiera się na odczuciach klientów względem produktów, usług lub doświadczeń związanych z przedsiębiorstwem. Jest to kluczowe narzędzie analizy, które pomaga organizacjom zrozumieć, jak dobrze spełniają oczekiwania i potrzeby swoich klientów. Metoda ta jest bardzo łatwa w użytkowaniu oraz odpowiada na następujące, ważne z perspektywy zarządczej pytania [15, s. 77]:

- jakie są oczekiwania klientów,
- w jakim stopniu przedsiębiorstwo spełnia te oczekiwania,
- jak ważne dla klientów są badane aspekty,
- które obszary wymagają poprawy.

Wskaźnikiem zadowolenia jest wartość wyrażana procentowo bądź nominalnie. W przypadku pierwszej opcji do interpretacji mogą posłużyć kryteria, które zestawiono w tabeli 1. Do oceny poszczególnych kryteriów użyto pięciostopniowej skali typu Likerta, gdzie 5 oznaczała ocenę najwyższą, 1 zaś najniższą [8, s. 222].

TABELA 1. Kryteria oceny CSI %

Kryteria wartości CSI %	Ocena	Interpretacja
0–40	bardzo źle	klient skrajnie niezadowolony
40–60	źle	klient niezadowolony
60–75	średnio	występują pewne problemy w zakresie zadowolenia klienta
75–90	dobrze	występują nieliczne problemy związane z zadowoleniem klienta
90–100	bardzo dobrze	klient zadowolony w wysokim stopniu

ŹRÓDŁO: opracowanie własne na podstawie: R. Wolniak, B. Skotnicka-Zasadzień, *Wybrane metody badania satysfakcji klienta i oceny dostawców w organizacjach*, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2008, s. 80; J. Frąś, *Wybrane instrumenty pomiaru jakości usług logistycznych*, „Zeszyty Naukowe Uniwersytetu Szczecińskiego. Finanse, Rynki Finansowe, Ubezpieczenia” 2014, nr 66, s. 297–317.

Schemat postępowania analizy jakości usług metodą CSI można podzielić na następujące etapy [18, s. 221]:

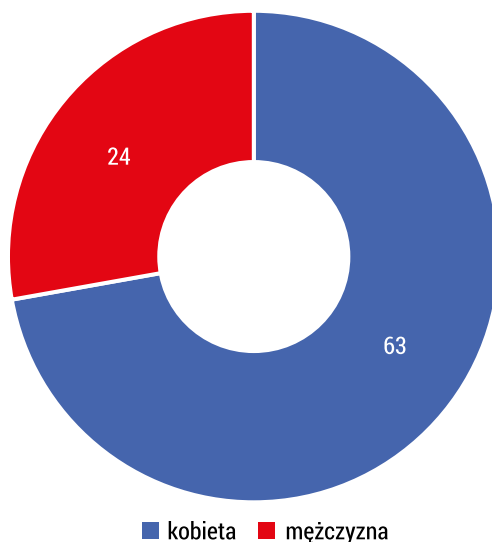
- określenie grupy klientów;
- wybór cech jakości;
- projekt kwestionariusza;
- wyrywkowe badanie wcześniej określonej grupy;
- opracowanie zgromadzonych danych;
- obliczenie wskaźnika CSI;
- graficzne przedstawienie wyników;
- interpretacja wyników.

Uzyskane wyniki badania pozwalają określić, co należy poprawić w analizowanym przedsiębiorstwie. Ponadto umożliwiają porównanie go z innymi jednostkami gospodarczymi o podobnym lub tym samym zakresie usług.

4. Analiza wyników badań

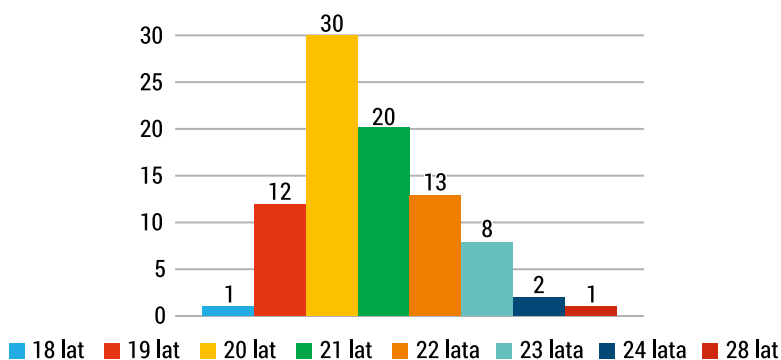
Proces badawczy przeprowadzono w listopadzie 2023 r. wśród grupy 87 studentów Politechniki Rzeszowskiej (pasażerów MPK Rzeszów). Narzędziem badawczym był kwestionariusz ankiety. Dane zgromadzono metodą CAWI (*Computer Aided Web Interview*), która polega na rozesłaniu ankiety w formie elektronicznej. Grupą docelową, której udostępniono kwestionariusz, byli studenci. Wyniki uzyskane w trakcie realizacji badań zostały wykorzystane do opracowania metody CSI.

W badaniu ankietowym udział wzięły 63 kobiety i 24 mężczyzn. Dokładną strukturę płci przedstawiono na wykresie 1.



RYS. 1. Struktura odpowiedzi na pytanie o płeć

ŹRÓDŁO: opracowanie własne.



RYS. 2. Wiek respondentów

ŹRÓDŁO: opracowanie własne.

Zgodnie z założeniem grupa respondentów to przedstawiciele pokolenia Z, w związku z tym wiek ankietowanych to 18–28 lat, czyli osoby urodzone między 1992 a 2010 r.

Respondenci musieli ocenić również, jak często korzystają z usług MPK Rzeszów. Trzydzieści osób przyznało ocenę 5, czyli „bardzo często”, natomiast jedynie pięć osób wybrało ocenę 1, czyli „bardzo rzadko”.

W kolejnej części ankiety wybranej grupie osób zadano pytania związane z usługami oferowanymi przez MPK Rzeszów. Podzielono je na dwie części – ze względu na ocenę kryterium i jego istotność. Badane cechy zostały wybrane na podstawie własnych przemyśleń oraz literatury przedmiotu. Odpowiedzi na pytania zawarte w kwestionariuszu ankietowym, a także obliczone średnie wskaźniki zadowolenia i znaczenia czynników przedstawiono w tabeli 2.

TABELA 2. Szczegółowa analiza sześciu badanych obszarów

Wskaźnik zadowolenia	Wyniki badań										Wskaźnik znaczenia	
	zadowolenie					czynniki satysfakcji	znaczenie					
	bardzo zadowolony	raczej zadowolony	obojętny	raczej niezadowolony	bardzo niezadowolony		bardzo ważne	ważne	obojętne	małe znaczenie		nie ma znaczenia
3,44	30	11	18	23	5	istota usługi	35	26	14	7	5	3,91
3,7	6	48	23	8	2	dostępność	45	25	7	3	7	4,13
3,7	14	45	20	4	4	bezpieczeństwo	50	24	10	0	3	4,36
3,41	13	29	29	13	3	dostępność informacji	32	30	16	6	3	3,94
3,28	11	26	30	16	4	punktualność	63	17	4	1	2	4,59
2,14	1	5	25	30	26	cena	54	19	9	2	2	4,39

ŹRÓDŁO: opracowanie własne.

Do analizy posłużono się wzorem [15, s. 78] na wskaźnik zadowolenia klienta:

$$CSI = \sum_{i=1}^N w_i \cdot c_i$$

gdzie: CSI – wskaźnik zadowolenia klientów, i – numer kolejnego kryterium, N – liczba kryteriów uwzględniona w analizie, w_i – waga kryterium, c_i – ocena zadowolenia z kryterium.

Wartość procentową wskaźnika zadowolenia obliczono na podstawie wzoru:

$$CSI_{\%} = \frac{\text{uzyskany wynik CSI}}{\text{maksymalny możliwy do uzyskania wynik CSI}} \cdot 100\%$$

gdzie $CSI_{\%}$ – procentowy wskaźnik zadowolenia klienta.

Analiza przeprowadzonych badań pozwala stwierdzić, że ankietowani najwyżej ocenili bezpieczeństwo oraz dostępność usług świadczonych przez MPK Rzeszów, ponieważ ocena tych wymagań wyniosła 3,7. Natomiast najniższy wynik uzyskała cena biletu – z wartością 2,14. W przypadku hierarchii ważności konkretnych wymagań najważniejsza dla respondentów okazała się punktualność, która uzyskała wartość 4,59. Reszta badanych obszarów również jest istotna dla ankietowanych, gdyż najniższa wartość (jakość usługi) ukształtowała się na poziomie 3,91.

Kolejny etap analizy polegał na określeniu wagi względnej dla poszczególnych wskaźników. W celu lepszej interpretacji wyników obliczono wartość maksymalną (przedstawioną w procentach). Wyniki dla wskaźników CSI, CSI MAX, CSI% przedstawiono w tabeli 3.

TABELA 3. Obliczenie CSI, CSI max oraz CSI %

Wymagania	Ocena wymagań	Waga wymagań	Waga względna	Wskaźnik CSI	Wskaźnik CSI MAX	
Istota usługi	3,44	3,91	0,154	0,531	0,772	
Dostępność	3,7	4,13	0,163	0,604	0,816	
Bezpieczeństwo	3,7	4,36	0,172	0,637	0,861	
Informacje	3,41	3,94	0,156	0,531	0,778	
Punktualność	3,28	4,59	0,181	0,595	0,906	
Cena	2,14	4,39	0,173	0,371	0,867	
		Σ = 25,32	–	Σ = 3,268	Σ = 5	CSI %
						65%

ŹRÓDŁO: opracowanie własne na podstawie przeprowadzonych badań.

Wskaźnik CSI % dla MPK Rzeszów wyniósł 65%, co oznacza, że znajduje się on na średnim poziomie. Można to interpretować tak, iż podczas oferowania usług występują pewne problemy zauważane przez klientów przewoźnika.

Na podstawie uzyskanych wyników zobrazowano mapę jakości, która jest uzupełnieniem interpretacji wskaźnika CSI. Na podstawie średnich wartości istotności kryteriów oraz poziomu zadowolenia konsumentów na wykresie rozrzutu określono cztery obszary. Schematycznie mapę jakości przedstawiono na rysunku 4. Kryteria wysokiej oceny zadowolenia klientów można podzielić na aspekty nieistotne, do których klienci nie przywiązują znaczącej wagi, oraz takie, których poziom należy utrzymać.

Kryteria niskiej oceny zadowolenia klienta można podzielić na aspekty, które są ważne dla klientów i muszą zostać poprawione natychmiast, oraz te, które mogą być poprawione, ale mają mniejsze znaczenie dla klienta.



RYS. 4. Obszary mapy jakości

ŹRÓDŁO: opracowanie własne na podstawie: R. Wolniak, B. Skotnicka-Zasadzień, *Wybrane metody badania satysfakcji klienta i oceny dostawców w organizacjach*, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2008, s. 94.

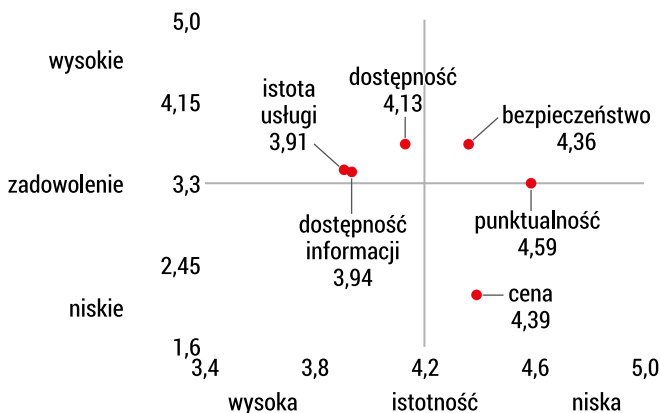
Wykonując mapę jakości, w pierwszej kolejności należy wyznaczyć punkty jej podziału. W tym celu posłużono się wartościami średnimi dla ocen jakości i znaczenia kryteriów. Wyniki przedstawiono w tabeli 4.

TABELA 4. Kryteria wyznaczenia punktów podziału mapy jakości

Aspekt	Waga czynnika	Ocena czynnika
Istota usługi	3,91	3,44
Dostępność	4,13	3,7
Bezpieczeństwo	4,36	3,7
Dostępność informacji	3,94	3,41
Punktualność	4,59	3,28
Cena	4,39	2,14
Średnia	4,2	3,3

ŹRÓDŁO: opracowanie własne.

Na wykres naniesiono punkty podziału oraz badane aspekty według istotności i zadowolenia. Całość przedstawiono na rysunku 5.



RYS. 5. Mapa jakości usług dla MPK Rzeszów

ŹRÓDŁO: opracowanie własne.

Na podstawie informacji z rysunku 5 można wyciągnąć wnioski, że zdaniem pasażerów z pokolenia Z [8, s. 5099]:

- obszarami, na które należy zwrócić szczególną uwagę i wzmocnić w pierwszej kolejności, są cena i punktualność,
- obszary, które należy utrzymać, to bezpieczeństwo,
- obszary, które nie mają dużego znaczenia, to dostępność, istota usługi oraz dostępność informacji.

5. Podsumowanie

Metoda badania satysfakcji klienta, jaką jest *Customer Satisfaction Index* (CSI), stanowi kluczowe narzędzie dla efektywnej oceny działalności przedsiębiorstw oraz osiągnięcia satysfakcji klientów poprzez dostarczane produkty i usługi. W kontekście usługi transportowej w Rzeszowie oferowanej przez przewoźnika MPK Rzeszów analizie poddano oceny poszczególnych kryteriów i ich istotności.

W pierwszej kolejności badane przedsiębiorstwo powinno zwiększyć poziom uwagi, jaką poświęca swoim klientom i ich indywidualnym wymaganiom. To kluczowy element budowania trwałych relacji z klientami, a jeśli ci są zadowoleni, często stają się ambasadorami marki, przyczyniając się do pozytywnego wizerunku firmy.

Zdaniem respondentów jednymi z najważniejszych kryteriów są bezpieczeństwo i dostępność usługi transportowej. Klienci, zwłaszcza z pokolenia Z, cenią sobie skuteczność, łatwość oraz bezpieczeństwo korzystania z oferowanych usług. Poprawa tych aspektów może znacząco wpłynąć na ogólną satysfakcję klientów i ich lojalność wobec firmy.

Najślabsze zaś oceny uzyskało pytanie dotyczące ceny aktualnych biletów MPK Rzeszów. Według ankietowanych dotychczasowe ceny nie spełniają ich oczekiwań, co jednoznacznie wskazuje na istnienie problemów w tym obszarze. To zagadnienie jest słabym punktem w ofercie przedsiębiorstwa, co może negatywnie wpływać na ogólną ocenę doświadczeń klienta.

Jednymi z najbardziej istotnych kryteriów według respondentów są punktualność i dostępność. Punktualność jest niezaprzeczalnie jednym z filarów udanej obsługi, a jej brak może znacząco wpływać na ogólną ocenę świadczonych usług. Klienci cenią sobie efektywne i zgodne z harmonogramem podróże, co staje się kluczowym elementem ich doświadczenia z korzystania z usług MPK Rzeszów.

Dostępność to kolejny istotny aspekt, który przyczynia się do pozytywnego odbioru przedsiębiorstwa przez klientów. Zapewnienie łatwego dostępu do środków transportu publicznego sprawia, że korzystanie z usług staje się wygodne. Skuteczna organizacja rozkładów jazdy oraz dostosowanie oferty do potrzeb różnych grup społecznych są kluczowe dla zwiększenia zadowolenia klientów.

Podsumowując, wykorzystanie metody CSI pozwala dostarczyć cennych informacji na temat poziomu zadowolenia klientów MPK Rzeszów. Wnioski te stanowią bazę do działań doskonalących, które powinny być podejmowane przez przedsiębiorstwo w celu podniesienia jakości świadczonych usług i budowania pozytywnego doświadczenia klienta. Niemniej badania satysfakcji należy przeprowadzić wśród każdej grupy wiekowej klientów, aby uzyskać bardziej miarodajne wyniki.

Literatura

- [1] Badzińska E., Gołąb-Andrzejak E., *Satysfakcja klientów jako źródło sukcesu organizacji – studium przypadku*, „Zeszyty Naukowe Uniwersytetu Szczecińskiego. Problemy Zarządzania, Finansów i Marketingu” 2015, nr 41, t. 1, s. 81–91.
- [2] Całek A., *Pokolenie Z – próba diagnozy*, „Zeszyty Prasoznawcze” 2021, nr 64 (245), s. 105–108.
- [3] Chomicka A., Cież M., Dankiewicz M., *Psychologiczna charakterystyka pokolenia Z. Przegląd badań*, „Humanitarian Corpus” 2022, nr 44 (National Pedagogical Drahomanov University).
- [4] Drapińska A., *Zarządzanie relacjami na rynku usług edukacyjnych szkół wyższych*, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 2011.
- [5] Frąs J., *Wybrane instrumenty pomiaru jakości usług logistycznych*, „Zeszyty Naukowe Uniwersytetu Szczecińskiego. Finanse, Rynki Finansowe, Ubezpieczenia” 2014, nr 66, s. 297–317.
- [6] Alexander J., Hill N., *Pomiar satysfakcji i lojalności klientów*, Oficyna Ekonomiczna, Kraków 2003.
- [7] Hoyer Brooke B.Y., Hoyer R.W., *What Is Quality?*, „Quality Progress” 2001, nr 34 (7), s. 53–62, <https://asq.org/quality-progress/articles/what-is-quality?id=3944a2adfd33497bb-8c5a7a59acf759c> [dostęp: 1.12.2023].
- [8] Lis M., Siembab E., Woźniak J., *Analiza i próba doskonalenia logistycznej obsługi klienta w wybranym przedsiębiorstwie z zastosowaniem metody CSI [w:] Ocena i doskonalenie wybranych procesów logistycznych*, red. M. Szydelko, Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej, Rzeszów 2023, s. 18.

- [9] Marszałek S., *Ekonomika, organizacja i zarządzanie w transporcie*, Wydawnictwo Śląskiej Wyższej Szkoły Zarządzania, Katowice 2001.
- [10] Mazurek-Lopacińska K., *Generacja Z – cele, wartości życiowe i wyzwania dla współczesnych przedsiębiorstw*, „Konsumpcja i Rozwój” 2018, nr 4 (25), s. 62–75.
- [11] Mendyk E., *Ekonomika transportu*, Wyższa Szkoła Logistyki, Poznań 2009.
- [12] Payne A.A., *Marketing usług*, PWE, Warszawa 1996.
- [13] Prakash Yadav G., Rai J., *The Generation Z and their Social Media Usage: A Review and a Research Outline*, „Global Journal of Enterprise Information System” 2017, nr 9 (2), s. 110–116.
- [14] Skotnicka-Zasadzień B., Wolniak R., *Wybrane metody badania satysfakcji klienta i oceny dostawców w organizacjach*, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2008.
- [15] Starowicz W., *Jakość usług w publicznym transporcie pasażerskim. Charakterystyka nowej polskiej normy*, „Transport Miejski i Regionalny” 2004, nr 10, s. 28–34.
- [16] Szydełko M., Woźny M., *Measuring the quality of logistics services for individual customers using the SERVQUAL method with an exemplary company from the CEP industry*, „Humanities and Social Sciences” 2023, nr 3 (30), <https://doi.org/10.7862/rz.2023.hss.34> [dostęp: 1.12.2023].
- [17] Woźniak J., Zimon D., *Zastosowanie metody CSI do badania satysfakcji konsumentów na przykładzie wybranej sieci handlowej*, „Modern Management Review” 2016, <https://doi.org/10.7862/rz.2016.mmr.37> [dostęp: 1.12.2023].
- [18] Kruk U., Zimon D., *Wykorzystanie metody CSI do badania logistycznej obsługi klienta na przykładzie wybranej organizacji*, „Logistyka” 2015, nr 3, https://www.researchgate.net/publication/302524351_Wykorzystanie_metody_CSI_do_badiana_logistycznej_obsługi_klienta_naprzykładzie_wybranej_organizacji [dostęp: 1.12.2023].
- [19] Hasło: *satysfakcja*, Słownik języka polskiego, <https://sjp.pwn.pl/slowniki/satysfakcja> [dostęp: 17.04.2024].

Koncepcja rozbudowy dróg rowerowych Velo Wisłok na obrzeżach Rzeszowa

Izabela Domin, Justyna Dyrkacz, Mateusz Bajek, Patryk Dąbrowski

*Politechnika Rzeszowska, Koło Naukowe Drogowców
161089@stud.prz.edu.pl*

Summary: The article presents a concept for a new bicycle path connection between Rzeszów and Boguchwała. The aim of article was the new conception of a bicycle path in Rzeszów to ensure the safety of cyclists and increase the tourist attractiveness of a given area. The route will provide a fast and safe connection between Rzeszów and Boguchwała, eliminating the need to travel on heavy traffic condition. The route will allow to observe nature and the Wisłok River, which is part of the Natura 2000 area. The article discusses the issue of bicycle paths of a tourist and communication nature.

Key words: bicycle path, cyclist, expanding, tourist

1. Wstęp

Rower jest środkiem transportu, który może być wykorzystywany do odbywania różnorodnych podróży, a w związku z tym do tworzenia konkurencyjnego podsystemu transportowego w stosunku do samochodowego, jak również transportu zbiorowego. Dysponując odpowiednią infrastrukturą, można wpływać na zachowania użytkowników systemu transportowego i skłaniać ich do częstszego wybierania roweru jako środka transportu. Dobrze zaplanowana sieć dróg dla rowerów (DDR) przyczynia się do poprawy efektywności systemu transportowego, na co wskazują dotychczasowe badania i doświadczenia [1].

Korzyścią, jaką daje rower miejski, jest to, że może być łączony z różnymi środkami transportu, umożliwia bezpłatne lub tanie podróżowanie na krótkich odległościach, co prowadzi do zmniejszenia natężenia ruchu, hałasu oraz zanieczyszczeń. Takie rozwiązanie wydaje się bardzo atrakcyjne w przypadku podejmowania multimodalnych podróży.

Ruch rowerowy może być organizowany na wiele sposobów. Warto zwrócić uwagę na to, aby był on odseparowany od dróg publicznych. Miałoby to nie tylko znaczenie

rekreacyjno-turystyczne, lecz także ułatwiłoby przebieg tras podstawowych i uzupełniających. Przebieg trasy dla rowerów powinien zapewniać jak największą bezpośredniość powiązań, a przyjęte rozwiązania techniczne powinny być w miarę możliwości jednorodne, tak aby zagwarantować jak największy komfort i bezpieczeństwo użytkownika.

Zgodnie z rekomendacjami Centrum Informacji i Technologii dla Transportu i Infrastruktury (CROW) [5] infrastruktura dla rowerów powinna spełniać wymagania: bezpieczeństwa, spójności, bezpośredniości, wygody i atrakcyjności (rys. 1).



RYS. 1. Wytyczne dotyczące infrastruktury dla rowerów według CROW

ŹRÓDŁO: opracowanie własne.

Stosowanie się do powyższych zaleceń pozwala zapewnić:

- wysoki poziom bezpieczeństwa ruchu wobec braku konfliktów ze zmotoryzowanymi użytkownikami drogi,
- atrakcyjność ze względu na otoczenie (np. zieleni) i brak wpływu niekorzystnych czynników ruchu samochodów (hałas, zanieczyszczenie powietrza),
- możliwość wyznaczenia skrótów w sieci transportowej.

2. Przykłady rozwiązań przebiegu ścieżek rowerowych ze względu na warunki środowiska

Z uwagi na założony cel projektu – opracowanie koncepcji przebiegu trasy rowerowej wzdłuż Wisłoka – należało znaleźć jak najlepsze rozwiązanie tego problemu. Inspiracją do realizacji celu była ścieżka rowerowa poprowadzona przez środek jeziora w prowincji Limburgia w Belgii [2]. Aby umożliwić zwiedzanie parku, stworzono sieć ścieżek rowerowych. Tworząc jedną z nich, architekci z BuroLandschap chcieli jak najmniej ingerować w naturę. Nie zdecydowano się więc na budowę mostu ani kładki nad jeziorem, ale zaproponowano poprowadzenie ścieżki poniżej poziomu tafli wody. Tak zaprojektowano niezwykłą trasę rowerową *Cycling through Water* o długości 212 m, 3 m szerokości i ścianach o wysokości około 160 cm. Przypomina otwartą z jednej

strony rynną ułożoną poniżej poziomu wody. Ścieżkę wewnątrz wyłożono specjalnymi antypoślizgowymi płytkami, a całą konstrukcję osadzono na palach, dzięki czemu betonowy korytarz nie hamuje przepływu wody w jeziorze. Budowę szlaku rowerowego połączono z projektami ochrony przyrody w okolicznych stawach. Ścieżka mimo bardzo atrakcyjnego wyglądu (rys. 2) nie okazałaby się dobrym rozwiązaniem na rzece, gdzie poziom wody jest zmienny w zależności od pory roku. Dodatkowo teren nadrzeczny jest położony kilka metrów wyżej niż tafla wody, a to przysporzyłoby sporo pracy i opóźniło termin oddania trasy do użytku.



RYS. 2. *Cycling through Water* – ścieżka rowerowa w Belgii biegnąca przez środek jeziora

ŹRÓDŁO: [2].

Kolejnym wzorcem była ścieżka rowerowa, która wiedzie po nasypie kolejowym dawnej kolei parowej na dwóch odcinkach:

- Stypułów – Koźuchów – Nowa Sól o długości 18 km,
- Nowa Sól – Otyń – Stany (most nad Odrą) – Lipiny – Lubięcín – Konotop – Kolsko o długości 30 km [3].

Nim powstała ścieżka, rowerzyści musieli przenosić swoje pojazdy przez most. Usunięcie szyn pozwoliło na połączenie obu brzegów rzeki Odry i stworzenie najpiękniejszej trasy rowerowej w województwie lubuskim.



RYS. 3. Adaptacja wiaduktu kolejowego na drogę dla rowerów w powiecie nowosolskim

ŹRÓDŁO: [3].

Rozwiązania tego nie można było jednak zaaplikować w opracowywanej koncepcji z uwagi na fakt, że na projektowanym odcinku nie znajduje się żaden nieużytkowany most kolejowy.

Świetnym przykładem okazał się fragment nadmorskiej drogi rowerowej R10 na wędrującej wydmie usytuowanej na 200 palach wbitych na głębokość od 5 do 6 m [4]. Łącznie z dojazdami uzupełniającymi nadmorski szlak rowerowy w rejonie Dźwirzyna osiągnięto 1675 m długości trasy.



RYS. 4. Budowa trasy rowerowej na kładce posadowionej na palach

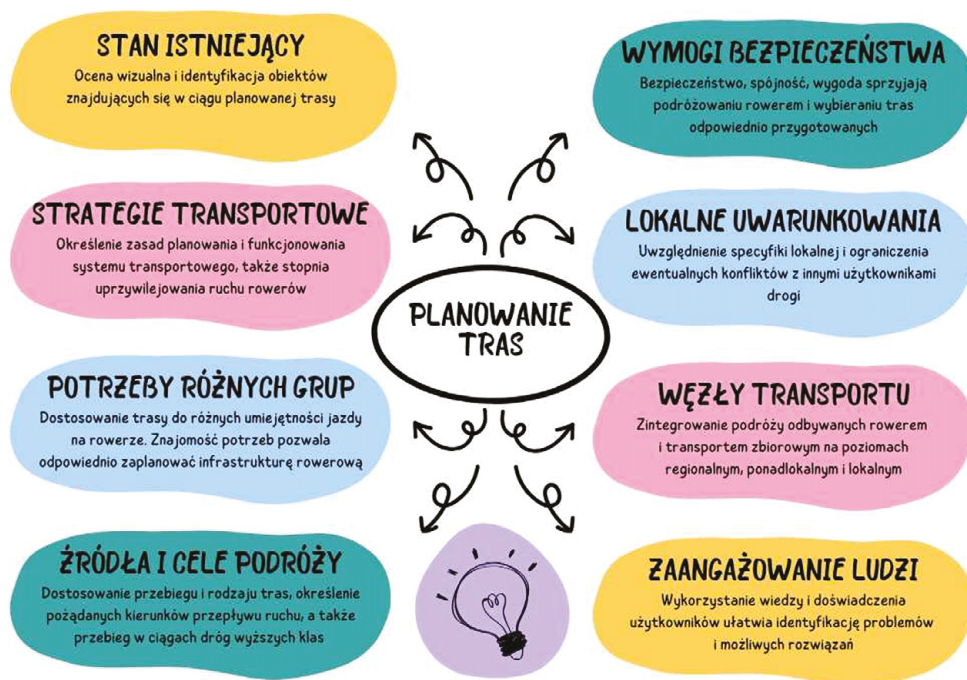
ŹRÓDŁO: [4].

3. Zalecenia projektowe w projektowaniu dróg dla rowerów

Przy projektowaniu tras dla rowerów można postępować według wytycznych [5–7], których celami są:

- ułatwienie rozwoju i poprawa jakości infrastruktury dla rowerów,
- ujednolicenie zasad planowania infrastruktury dla rowerów,
- ułatwienie współpracy planistów i projektantów z administracją drogową i jednostkami samorządu terytorialnego odpowiedzialnymi za rozwój infrastruktury dla rowerów na etapie planowania i przygotowywania inwestycji.

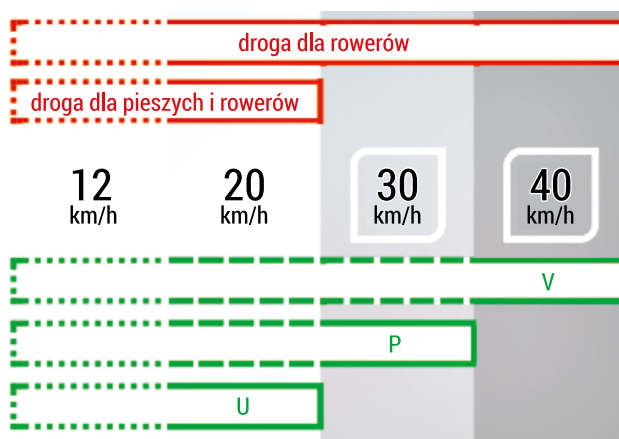
Wytyczne wskazują, co należy uwzględnić przy planowaniu tras rowerowych, aby były one jak najbardziej atrakcyjne i bezpieczne dla użytkowników (rys. 5).



RYS. 5. Planowanie tras dla rowerów

ŹRÓDŁO: opracowanie własne.

Podczas procesu projektowania dróg dla pieszych i rowerów ważny jest również aspekt prędkości do projektowania, który powinien być dobrany zgodnie z rys. 6.



RYS. 6. Prędkość do projektowania tras rowerowych w zależności od rodzaju infrastruktury i klasy funkcjonalno-technicznej: V – velostrada, P – trasa podstawowa, U – trasa uzupełniająca

ŹRÓDŁO: [6].

Zgodnie w wytycznych [6] zaleca się, aby szerokość DDR przyjmowała wartości minimalne:

- 1,5 m, gdy jest jednokierunkowa,
- 2,0 m, gdy jest dwukierunkowa,
- 2,5 m, gdy ze ścieżki mogą korzystać również piesi.

Wartości te należy dobierać ze względu na parametr przepustowości. Przy natężeniu ruchu około 100 rowerzystów na godzinę zaleca się już zwiększenie szerokości ścieżki jednokierunkowej do 2 m.

Trasy rowerowe muszą być projektowane w taki sposób, aby unikać zróżnicowania wysokościowego i minimalizować pochylenia niwelety. Chęć masowego używania roweru, a tym samym wynikająca z tego wielkość natężenia ruchu rowerowego jest bowiem uzależniona od pochyłeń niwelety występujących na trasie. Wiąże się to z wysiłkiem, jaki muszą wydatkować rowerzyści na ich pokonanie. Dla ruchu rowerowego pod górę należy tak projektować trasy, by pochylenia były większe na dolnym odcinku i stopniowo się zmniejszały przy dojeździe do szczytu wzniesienia. Takie podejście pozwala na utrzymywanie jednostajnej prędkości jazdy na długości trasy. Co 2÷5 m różnicy wysokości należy projektować spocznik o długości 25 m, dzięki niemu komfort jazdy rowerem ulega poprawie. Pochylenia podłużne ścieżki rowerowej powinny być ustalane z uwzględnieniem maksymalnych wartości pochylenia niwelety i maksymalnych długości, na jakich to pochylenie można stosować, zależnych od różnicy wysokości do pokonania (tabela 1). Zaleca się przy tym, aby nie przekraczać pochyłeń 5%, wyjątkowo dopuszcza się większe pochylenie, ale maksymalnie 15%.

TABELA 1. Maksymalne pochylenie niwelety w zależności od różnicy wysokości i długości pochylenia

Różnica wysokości [m]	Maksymalne pochylenie niwelety [%]	Maksymalna długość pochylenia niwelety [m]
1	12	8
2	10	20
4	6	65
6	5	120
10	4	250
>10	3	dowolna

ŹRÓDŁO: opracowanie własne.

Wraz ze wzrostem pochylenia niwelety (stromości trasy) wzrasta zagrożenie bezpieczeństwa rowerzystów poruszających się w dół, jest to związane m.in. z wielkością łuków pionowych. Dla pochylenia niwelety równego 5% prędkość projektowa powinna wynosić co najmniej 40 km/h, a dla pochylenia niwelety 3% – 36 km/h. Oznacza to,

że krzywizny muszą być tak zaprojektowane, aby widoczność w każdym punkcie projektowanej trasy rowerowej była zachowana na długości co najmniej 140 m, a łuki pionowe powinny być kształtowane w łukach o promieniu co najmniej 25 m (tabela 2).

TABELA 2. Zależność pomiędzy prędkością a minimalnymi promieniami łuków pionowych

Prędkość do projektowania [km/h]	Minimalny promień łuku wypukłego [m]	Minimalny promień łuku wklęsłego [%]
20	40 (20)	25 (10)
30	80 (40)	50 (20)
40	150 (65)	100 (40)

ŹRÓDŁO: opracowanie własne.

Pochylenie poprzeczne DDR powinno być jednostronne i mieścić się w granicach od 1% do 3% w zależności od rodzaju nawierzchni. Sam dobór konstrukcji nawierzchni jezdni rowerowej powinien być dostosowany do potrzeb użytkowników, z zapewnieniem bezpieczeństwa i komfortu jazdy, jak również w zakresie trwałości. Zadaniem projektanta jest określenie potrzeby zastosowania poszczególnych warstw w istniejących warunkach lokalnych oraz przyjęcie odpowiedniego typowego rozwiązania. W przypadku nawierzchni przeznaczonych do ruchu pieszych lub rowerów nie trzeba stosować warstwy podbudowy pomocniczej (chyba że trudne warunki gruntowe wymagają tego rozwiązania), a podbudowa zasadnicza jest zawsze jednowarstwowa. Ze względu na to, że projektowana ścieżka występuje na trudnym terenie podmokłym, skorzystano z gotowych zestawień poszczególnych warstw dla kategorii ruchu KR0 [8].

4. Droga dla rowerów Velo Wisłok

Istniejący obecnie fragment drogi dla rowerów z ciągiem dla pieszych prowadzi z centrum Rzeszowa lewym brzegiem Wisłoka w okolice rezerwatu przyrody Lisia Góra. Trasa pełni funkcję rekreacyjną i jest chętnie wybierana przez rowerzystów, osoby poruszające się na rolkach i pieszych.

W celu zwiększenia atrakcyjności oraz poprawy infrastruktury rowerowej Rzeszowa i sąsiadującej z nim miejscowości Boguchwała przeanalizowano główne problemy komunikacyjne tego obszaru. Przeprowadzono wizję lokalną mającą na celu określenie możliwości poprawy podróży między dwoma miastami na rowerze. Ze względów bezpieczeństwa na niektórych odcinkach poruszano się zwirowymi drogami dojazdowymi znajdującymi się pomiędzy DK19 a Wisłokiem (rys. 7). Wtedy też powstał pomysł zaprojektowania kontynuacji ścieżki rowerowej wzdłuż Wisłoka. Głównym celem było skupienie się na polepszeniu komunikacji rowerowej Rzeszowa

z sąsiadującą z nim Boguchwałą (rys. 8). Jednym z głównych problemów komunikacyjnych jest brak spójności sieci dróg rowerowych pomiędzy Rzeszowem a Boguchwałą, co skutkuje tym, że ruch rowerowy jest prowadzony w ciągu DK19 (20 tys. P/dobę), to zaś prowadzi do wysokiego prawdopodobieństwa wystąpienia wypadków i sytuacji niebezpiecznych. Droga jest tam dwukierunkowa, jednopasowa, z ograniczonymi poboczami. Wzdłuż drogi znajduje się chodnik, ale jego szerokość nie jest dostosowana do równoległego ruchu pieszych i rowerzystów. Kolejnym problemem są skarpy terenu, między którymi zlokalizowana jest DK19 (rys. 9).



RYŚ. 7. Źwirowa droga dojazdowa za kładką w Boguchwale

ŹRÓDŁO: opracowanie własne.



RYŚ. 8. Odcinek z infrastrukturą rowerową. ZUW – zakład uzdatniania wody, Fot. 1 zob. Rys. 9, TR1 – istniejąca infrastruktura rowerowa w obrębie Rzeszowa, Fot. 2 – zob. Rys. 10

ŹRÓDŁO: opracowanie własne przy wykorzystaniu Google Maps.



RYS. 9. Odcinek DK19, na którym jest utrudniony ruch rowerowy – Fot. 1 na Rys. 8

ŹRÓDŁO: Google Maps.



RYS. 10. Odcinek na ulicy Kwiatkowskiego, na którym jest utrudniony ruch rowerowy – Fot. 2 na Rys. 8

ŹRÓDŁO: Google Maps.

Pewnym rozwiązaniem problemu mogłyby być ciągi rowerowe wyznaczone na jezdni drogowej (rys. 11), ale rozwiązanie to z uwagi na bezpieczeństwo jest wykluczone w przypadku prowadzenia ruchu rowerowego na drodze krajowej o znacznych prędkościach i natężeniach ruchu pojazdów.



RYS. 11. Jezdnia z wydzielonym pasem dla rowerów na ulicy Księdza Józefa Jałowego w Rzeszowie

ŹRÓDŁO: opracowanie własne.

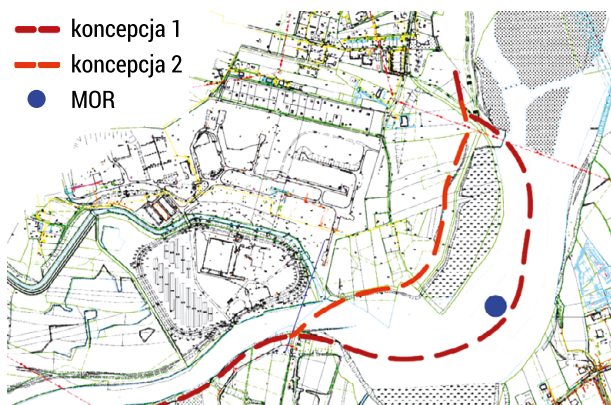
5. Omówienie propozycji koncepcji rozbudowy drogi dla rowerów

Istniejąca droga rowerowa wzdłuż Wisłoka pod względem stopnia trudności zaliczana jest do tras łatwych, umożliwia jazdę wszystkimi rodzajami rowerów, pochylenia niwelety są na niej minimalne, a różnice poziomów znikome. Analizując aspekty bezpieczeństwa, trasa ma zminimalizowaną liczbę punktów kolizji z ruchem samochodowym, nie ma na niej zagrożeń, jakie mogłyby spowodować gałęzie i drzewa. Podsumowując, istniejąca trasa rowerowa wraz z całym układem komunikacyjnym tworzy spójną, estetyczną, funkcjonalną całość, a bliskość natury – obecność rzeki oraz związanej z tym fauny i flory – sprawia przyjemność z jazdy rowerem w tej okolicy. Minusem tej trasy jest możliwość kolizji rowerzystów z pieszymi. Droga dla rowerów nie jest w żaden sposób oddzielona od ciągu pieszego, dlatego często piesi wchodzą rowerzystom pod koła.

W celu poprawy komunikacji rowerowej na relacji Rzeszów–Boguchwała zaproponowano dwa koncepcyjne warianty przebiegu nowej trasy rowerowej (rys. 12–13).

Koncepcja pierwsza zakłada kontynuację ścieżki rowerowej o długości 3,05 km. Prowadzi ona od zakładu uzdatniania wody wzdłuż lewego brzegu Wisłoka, a następnie przejście w kilometrażu 0+500 przez kładkę na prawy brzeg Wisłoka. W dalszej części trasa biegnąca w prawym dorzeczu ukończy swój bieg na wysokości istniejącej kładki na rzece w Boguchwale.

Koncepcja druga zakłada przedłużenie ścieżki rowerowej o długości 3,30 km od zakładu uzdatniania wody oraz przejście na tereny zielone, które znajdują się pośrodku rzeki, tworząc pewnego rodzaju wyspy dające możliwość poprowadzenia około 500-metrowej ścieżki rowerowej centralnie w biegu rzeki, a następnie przejście przez kładkę na prawy brzeg Wisłoka oraz dołączenie w dalszej części do istniejącej kładki na rzece w Boguchwale.



RYŚ. 12. Przebieg koncepcji w terenie (1/2)

ŹRÓDŁO: opracowanie własne.



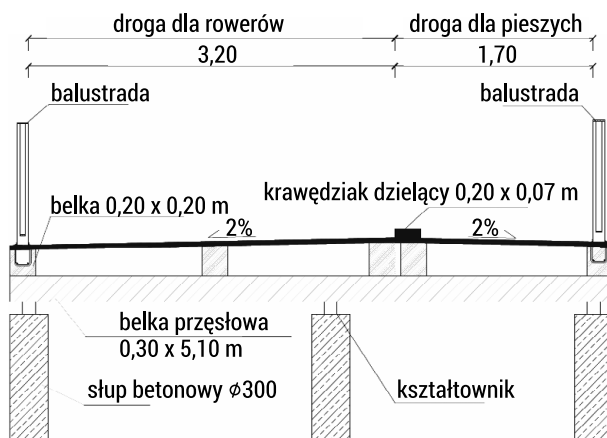
RYS. 13. Przebieg koncepcji w terenie (2/2)

ŹRÓDŁO: opracowanie własne.

6. Zestawienie parametrów dla projektowanej ścieżki rowerowej

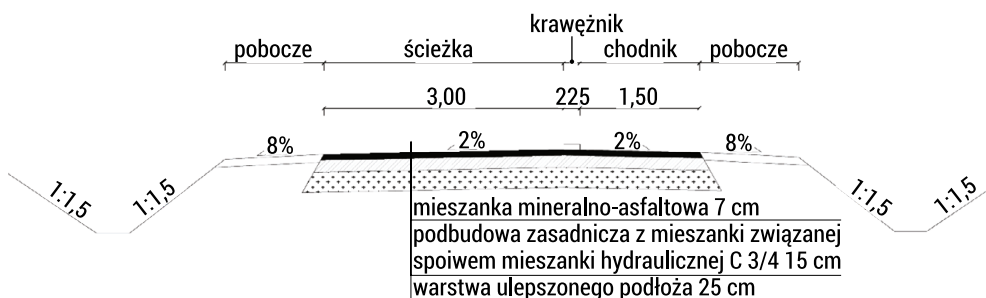
Ścieżka prowadzona zarówno wzdłuż lewego brzegu, jak i nad rzeką będzie wybudowana w całości jako konstrukcja drewniana. W zakresie przekroju poprzecznego zaprojektowano drogę rowerową o szerokości 3,0 m oraz chodnik dla pieszych o szerokości 1,5 m. Relacja pieszych z rowerzystami będzie oddzielona za pomocą drewnianej belki o szerokości 20 cm i wysokości 6 cm, co zapewni bezpieczeństwo podczas użytkowania oraz rozdzieli interakcję pieszych i rowerzystów. W celu maksymalizacji bezpieczeństwa na trasie zostaną zamontowane balustrady z zachowaniem odpowiedniej skrajni drogowej. Drewniana konstrukcja wkomponuje się idealnie w akcent przyrodniczy oraz będzie stanowiła lżejszą alternatywę, biorąc pod uwagę możliwości montażu i wykonania trasy na słabych bagiennych gruntach (rys. 14). W dalszej części zaproponowano przekrój szybszy w budowie, mianowicie ścieżkę asfaltową (rys. 15). Łącząc relacje po przejściu z lewego brzegu na prawy, trasa zostanie wykonana z betonu z zachowaniem przyjętych wcześniej szerokości. Trasa rowerowa została zaprojektowana tak, aby uniknąć nadmiernego zróżnicowania wysokości – minimalne pochylenie niwelety wynosi 0,07% oraz maksymalne 0,30%. Pochylenie poprzeczne jednostronne ścieżki rowerowej, a także deptaka wynosi 2%. Łuki poziome zostały wyokrąglone zgodnie z wytycznymi projektowania infrastruktury rowerowej WR-D-42-2 w taki sposób, by zachowano minimalne odległości widoczności, która odgrywa kluczową

rolę w zachowaniu bezpieczeństwa na trasie. Wyokrąglone łagodnie łuki zwiększają zarówno bezpieczeństwo, zmniejszając prędkość, jak i niwelują efekt znużenia, który może wystąpić podczas pokonywania prostych odcinków trasy. Zróżnicowana geometria pozwoli użytkownikowi na podziwianie piękna przyrody w dorzeczu Wisłoka.



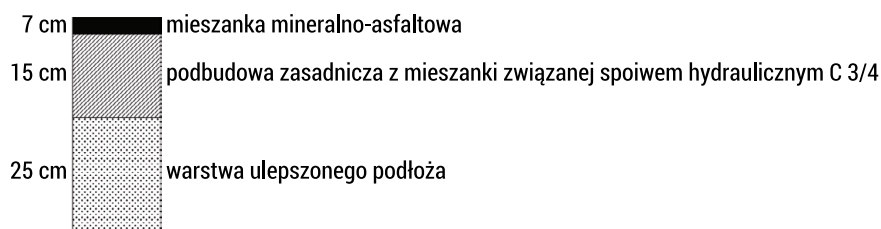
RYS. 14. Układ warstw ścieżki rowerowej w przekroju drewnianym

ŹRÓDŁO: opracowanie własne.



RYS. 15. Układ warstw ścieżki rowerowej o przekroju bitumicznym

ŹRÓDŁO: opracowanie własne.



RYS. 16. Typowa konstrukcja nawierzchni jezdni przeznaczona do ruchu bardzo lekkiego

ŹRÓDŁO: opracowanie własne.

TABELA 3. Zestawienie przyjętych parametrów przekroju

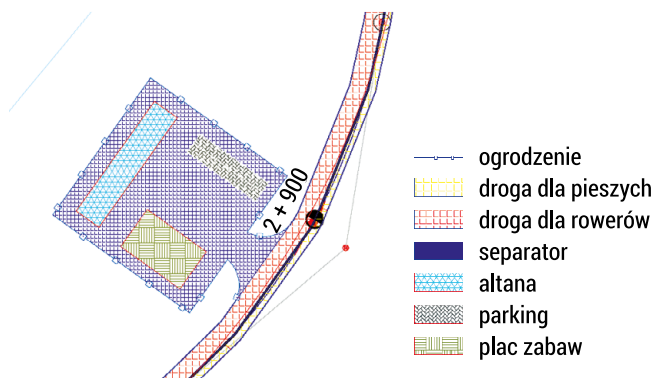
Prędkość do projektowania	20 km/h
Szerokość ścieżki rowerowej	3,0 m
Szerokość deptaka dla pieszych	1,5 m
Szerokość pasa dzielącego	0,5 m
Maksymalne pochylenie niwelety	0,30%
Minimalne pochylenie niwelety	0,07%
Pochylenie poprzeczne ścieżki rowerowej i deptaka	2,0%
Dolne warstwy konstrukcji nawierzchni	TYP 14–17 (rys. 16)
Górne warstwy konstrukcji nawierzchni	mieszanka mineralno-asfaltowa 7 cm, podbudowa zasadnicza z mieszanki związanej spoiwem hydraulicznym C3/4, warstwa ulepszonego podłoża 25 cm (rys. 16)

ŹRÓDŁO: [6], [8].

7. Problematyka wyboru spośród dwóch wariantów koncepcji projektu ścieżki rowerowej łączącej Rzeszów z Boguchwałą

Podstawowymi kryteriami, którymi kierowano się w trakcie wyboru lokalizacji, w jakiej miała powstać ścieżka rowerowa Velo Wisłok, były atrakcyjność przyrodnicza oraz możliwość połączenia siecią rowerową dwóch sąsiadujących miast. Wyboru danej lokalizacji poza jej walorami przyrodniczymi dokonano, uwzględniając możliwość rozwoju turystycznego obszaru, przez który przebiega ścieżka. Zostanie ona zaprojektowana po wcześniejszej wizji lokalnej z fotorelacją. Ponieważ oba warianty przebiegu ścieżki będą wzdłuż rzeki Wisłok, projekt powinien zawierać również badania geologiczne, które zapobiegą niepożądanym zjawiskom, jak np. osuwiska czy grunty wysadzinowe. Trasa rowerowa została zaprojektowana w ten sposób, aby jak najmniej wpływała na walory krajobrazowe, a jednocześnie spełniała funkcję rekreacyjną. Problemami, które mogą zaistnieć w trakcie projektowania czy też wykonawstwa ścieżki, są konieczność wpasowania się w krajobraz czy też złożone warunki gruntowe panujące na terenach projektowanej ścieżki. Należy zwrócić uwagę na poprawne oznakowanie ścieżki i komfort jazdy. Bardzo duży wpływ na to ma nawierzchnia, z jakiej zostanie wykonana ścieżka. Powinna być ona szorstka, co pozwoli swobodnie pokonywać zakręty i wspomóc proces hamowania. Równość będzie kolejną pożądaną cechą – dzięki niej minimalizowane będą wstrząsy, co poprawi komfort jazdy. Propozycja przebiegu proponowanej trasy rowerowej wzdłuż Wisłoka pod nazwą

Velo Wisłok ma w wariantcie 1 w km 2+900 miejsce obsługi rowerzystów (MOR), na którego wyposażenie składają się parking dla rowerów wraz z ławkami, stołami i altaną. Dla najmłodszych rowerzystów został zaprojektowany przestronny plac zabaw. MOR umiejscowiono w najbardziej malowniczym miejscu na trasie, co pozwoli docenić użytkownikowi walory przyrody w dorzeczu Wisłoka.



RYS. 17. Miejsce obsługi podróżnych km 2+900

ŹRÓDŁO: opracowanie własne.

8. Podsumowanie

W wyniku krótkiej analizy zaobserwowano, że proponowany projekt koncepcyjny nowej trasy rowerowej spełnia zasady CROW właściwie we wszystkich punktach, a szczególnie ze względu na bezpieczeństwo, bezpośredniość, wygodę i atrakcyjność. Ścieżka dla rowerów, która została zaprojektowana według danego pomysłu, niweluje wady ruchu rowerowego poza układem dróg. Na planowanym odcinku powstanie oświetlenie, które zapewni bezpieczeństwo dla jego użytkowników oraz dobrą widoczność. Ciąg rowerowy zostanie oddzielony wyższym krawężnikiem od ciągu spacerowego. Ze względu na przebieg koncepcji wzdłuż rzeki i przez Wisłok zostaną zastosowane także bariery zapewniające bezpieczeństwo uczestnikom ruchu. Projektowany wariant zapewni bezpośrednie i szybkie przemieszczenie się z Rzeszowa do Boguchwały i odwrotnie – bez konieczności jazdy po bardzo ruchliwej drodze krajowej. Trzeba podkreślić, że z punktu widzenia atrakcyjności poruszania się po opisanej trasie rowerowej należy ocenić ją pozytywnie. Podczas jazdy można podziwiać wszelaką faunę i florę, a szczególnie tę charakterystyczną dla terenów nadrzecznych. Obszar ten jest wpisany w teren specjalnej ochrony Natura 2000. Potwierdzono występowanie siedlisk dzikiego ptactwa oraz okazy roślin chronionych. Atrakcją jest też podziwianie Wisłoka i obserwowanie, jak w trakcie wielu lat ukształtowało się koryto tej rzeki. Nie można też nie wspomnieć o wygodzie tego rozwiązania – aż do istniejącej kładki w Boguchwałce poruszamy się po projektowanej ścieżce.

Unikamy jazdy raz po chodniku, a raz po ulicy, jak to jest w obecnych warunkach. Ważnym aspektem jest również to, że droga będzie pełnić dwie funkcje: turystyczno-rekreacyjną oraz komunikacyjną pomiędzy Rzeszowem a Boguchwałą. Należy zauważyć, że zaprojektowanie i wykonawstwo ścieżki rowerowej to bardzo złożony proces, który dobrze jest podzielić na kilka poszczególnych etapów, rozpoczynając od walo-rów krajobrazowych i turystycznych przez badania pozwalające poznać właściwości terenu aż po wyprofilowanie trasy w sposób maksymalnie bezpieczny oraz dający duży komfort jazdy. Zaproponowane warianty spełniają te wymogi, a co więcej, projekt ten pomoże rozwinąć sieć rowerową w Rzeszowie, która na dzień dzisiejszy nie była projektowana konsekwentnie, z szerszą wizją rozwoju. Podjęta inicjatywa pozwoli na popularyzację tras rowerowych kosztem rezygnacji z poruszania się pojazdami spalinowymi, co dodatkowo korzystnie wpłynie na środowisko.

Literatura

- [1] Bichajło L., Szarata M., *Atrakcyjność roweru miejskiego jako środka lokomocji na przykładzie Rzeszowa*, „Zeszyty Naukowe Politechniki Rzeszowskiej. Budownictwo i Inżynieria Środowiska” 2012, z. 59, nr 3/IV, s. 159–166.
- [2] *Ścieżka rowerowa przez środek jeziora*, Bryła.pl, <https://www.bryla.pl/sciezka-rowerowa-przez-srodek-jeziora> [dostęp: 8.02.2024].
- [3] *Kolej na rower, czyli ścieżka rowerowa przez powiat nowosolski*, Blog eTraper, <https://etraper.pl/blog/kolej-na-rower-czyli-sciezka-rowerowa-przez-powiat-nowosolski> [dostęp: 8.02.2024].
- [4] *Ten fragment nadmorskiej drogi rowerowej na wędrującej wydmie będzie niezwykle*, wyborcza.pl, <https://szczecin.wyborcza.pl/szczecin/7,34939,23085840,tenfragment-nadmorskiej-drogi-rowerowej-na-wedrujacej-wydmie.html> [dostęp: 2.09.2024].
- [5] WR-D-42-1 Wytyczne projektowania infrastruktury dla rowerów. Część 1: Planowanie tras dla rowerów. Wersja 01. Ministerstwo Infrastruktury, Departament Dróg Publicznych, 2022.
- [6] WR-D-42-2 Wytyczne projektowania infrastruktury dla rowerów. Część 2: Projektowanie dróg dla rowerów, dróg dla pieszych i rowerów oraz pasów i kontrapasów ruchu dla rowerów. Wersja 01. Ministerstwo Infrastruktury, Departament Dróg Publicznych, 2020.
- [7] WR-D-42-3 Wytyczne projektowania infrastruktury dla rowerów. Część 3: Projektowanie przejazdów dla rowerów oraz infrastruktury dla rowerów na skrzyżowaniach i węzłach. Wersja 01. Ministerstwo Infrastruktury, Departament Dróg Publicznych, 2020.
- [8] WR-D-63 Katalog typowych konstrukcji nawierzchni jezdni przeznaczonych do ruchu bardzo lekkiego oraz innych części dróg. Wersja 01. Ministerstwo Infrastruktury, Departament Dróg Publicznych, 2022.

Algorytm modyfikacji orientacji narzędzia robota przemysłowego w procesie wytwarzania addytywnego

*Marcin Górski, Antoni Skiba, Valerii Prykhodzenko,
Mikołaj Sowa, Jacek Domińczuk, Łukasz Sobaszek*

*Politechnika Lubelska, Koło Naukowe Robotyzacji i Zastosowań Informatyki
l.sobaszek@pollub.pl*

Summary: One contemporary example of the use of robots – robotic manufacturing by means of additive methods is presented. An important aspect of the process of robotic 3D printing is the proper orientation of the robot tool in the form of an extruder. The main aim of the paper is to present an algorithm for modifying the orientation of the robot tool as well as its implementation in the Matlab environment. The paper discusses the basic issues of modern manufacturing methods, robotic 3D printing, and robot programming for this process. Moreover, the process of algorithm effectiveness verification using the laboratory workstation prepared by students was described.

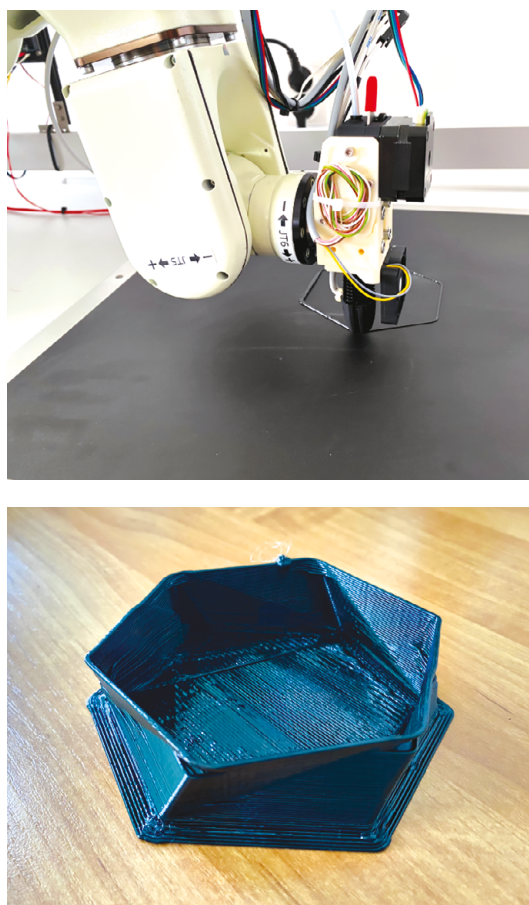
Key words: industrial robot, additive manufacturing, TCP

1. Wstęp

Jednym ze współczesnych mierników rozwoju systemów produkcyjnych jest coraz bardziej powszechne stosowanie robotów przemysłowych [1, 2]. Podejmowanie przedsięwzięć robotycznych zauważalne jest nie tylko w wielkich koncernach, lecz także coraz częściej w małych i średnich przedsiębiorstwach [3]. Coraz częstsze implementacje robotów spowodowane są szeregiem korzyści, jakie niesie za sobą ich wykorzystanie [4]. Niegdyś używane one były głównie podczas realizacji procesów uciążliwych i niebezpiecznych. Współcześnie znaczna liczba implementacji dotyczy wykorzystania robotów na stanowiskach, gdzie brakuje wykwalifikowanych pracowników, praca jest monotonna lub realizacja poszczególnych operacji wymaga niezwyklej precyzji [5]. W konsekwencji roboty przemysłowe pojawiają się coraz częściej przy pracach nietypowych, takich jak chociażby wytwarzanie addytywne czy obróbka 5D (rys. 1). W odróżnieniu od klasycznych rozwiązań 3D w tym przypadku występuje możliwość

dowolnego orientowania narzędzia robota [6], co pozwala na dodatkową rotację względem osi układu współrzędnych. Możliwość ta przekłada się na wytwarzanie elementów o alternatywnych strukturach, a przez to właściwościach wytrzymałościowych [7].

W odpowiedzi na zauważony trend wykorzystania robotów zdefiniowano problem badawczy, który brzmi: „W jaki sposób opracować algorytm modyfikacji orientacji narzędzia robota przemysłowego w procesie zrobotyzowanego druku 3D?”. Celem prezentowanych prac było stworzenie autorskiego algorytmu modyfikacji orientacji narzędzia robota przemysłowego w procesie zrobotyzowanego druku 3D i przeprowadzenie jego weryfikacji. Hipoteza badawcza brzmiała: „Przypuszcza się, że opracowany algorytm zostanie pozytywnie zweryfikowany”. W celu jej potwierdzenia jako metodę badawczą wykorzystano wnioskowanie, techniką badawczą było programowanie, a narzędziem system informatyczny Matlab.



RYS. 1. Przykład zrobotyzowanego druku 3D i wytworzonego w tym procesie elementu

ŹRÓDŁO: opracowanie własne.

W niniejszym tekście zaproponowano autorski algorytm modyfikacji orientacji narzędzia robota przemysłowego w procesie zrobotyzowanego druku 3D, dokonano też jego implementacji i weryfikacji. Całość przedstawionych badań została zrealizowana na autorskim stanowisku laboratoryjnym wyposażonym w robota przemysłowego Kawasaki RS003N, wykorzystano również kluczowe aplikacje komputerowe – środowisko obliczeniowe Matlab oraz środowisko programowania robotów off-line RoboDK [8].

2. Wykorzystanie robotów do prac w przestrzeniach 3D oraz 5D

Współczesne wykorzystanie robotów różni się w zależności od wymogów implementacji i parametrów ich pracy. Mogą być one używane zarówno w codziennym życiu (np. zautomatyzowane podawanie leków, wspomaganie funkcjonowania osób starszych, prace porządkowe), jak i przemyśle (np. pakowanie, obsługa maszyn, malowanie) [9]. Coraz częściej także roboty znajdują zastosowanie w realizacji prac w przestrzeniach 3D oraz 5D. Przykładem mogą być procesy spawania, drukowania, klejenia czy też obróbki ubytkowej.



RYŚ. 2. Robot spawalniczy Kawasaki Robotics

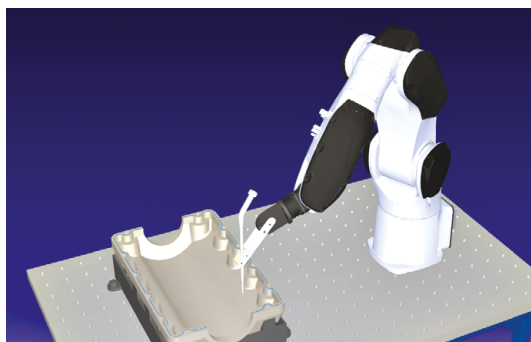
ŹRÓDŁO: [10].

W zakresie robót spawalniczych roboty umożliwiają automatyzację, zwiększają również efektywność tego procesu (rys. 2). Dzięki swojej precyzji i powtarzalności zapewniają one jednolite i dokładne połączenia. Dodatkowo roboty mogą pracować w niebezpiecznych lub trudno dostępnych obszarach, co zwiększa bezpieczeństwo i redukuje ryzyko dla pracowników [10].

Roboty mogą być także wykorzystywane do drukowania na różnych materiałach, takich jak papier, tkaniny czy tworzywa sztuczne. Są one precyzyjne i powtarzalne, co gwarantuje wysoką jakość i spójność wydruków. Ponadto mogą pracować w trybie

ciągłym, co przyspiesza produkcję i umożliwia drukowanie w większej skali. Coraz częściej też roboty wykorzystuje się do druku 3D.

Dzięki programowalnym ramionom i specjalistycznym narzędziom roboty klejące mogą aplikować klej w określonych miejscach z powtarzalną dokładnością. Automatyzacja tego procesu zwiększa efektywność, skraca czas produkcji i minimalizuje ryzyko błędów ludzkich [4]. Takie roboty są w stanie pracować w trudno dostępnych obszarach lub w warunkach, które mogą być niebezpieczne dla człowieka (rys. 3).



RYS. 3. Zrobotyzowane stanowisko klejenia w środowisku OLP

ŹRÓDŁO: opracowanie własne.

Wykorzystanie robotów w procesach obróbki ubytkowej znajduje również szerokie zastosowanie w przemyśle. Czołowym procesem jest frezowanie z użyciem głowicy zamontowanej na flanszy robota (rys. 4). Tego typu rozwiązania są stosowane zazwyczaj w obróbce wielkogabarytowych elementów z tworzyw sztucznych lub drewna [11].



RYS. 4. Wykorzystanie robota w procesie frezowania

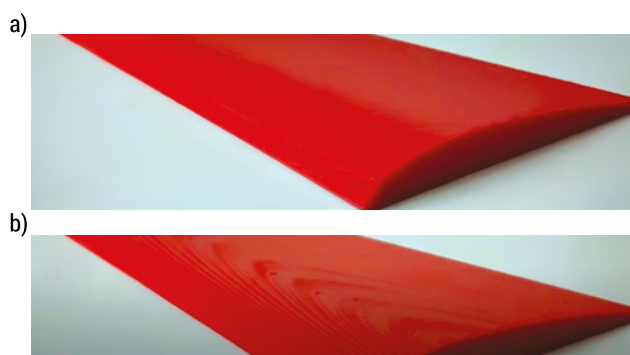
ŹRÓDŁO: [11].

Możliwości współczesnych robotów przemysłowych powodują, że coraz częściej stosuje się je do wytwarzania addytywnego – zarówno elementów o wymiarach osiągalnych dla klasycznych drukarek, jak i elementów wielkogabarytowych. Fakt ten wynika głównie z możliwości realizacji przez roboty zadań nie tylko w trzech, lecz także pięciu osiach.

3. Znaczenie i ograniczenia klasycznego druku 3D

Współcześnie druk 3D jest coraz bardziej popularną metodą wytwarzania. Coraz częściej drukarki 3D służą nie tylko do prototypowania czy edukacji, lecz także produkcji funkcjonalnych przedmiotów [12]. Popularność tej metody wynika głównie z faktu, iż pozwala na addytywne wytwarzanie trójwymiarowych obiektów o skomplikowanej geometrii. Jedną z najpowszechniejszych i najszerzej stosowanych metod druku 3D jest FDM, czyli *Fused Deposition Modeling*. Polega ona na warstwowym nanoszeniu na siebie cienkich warstw materiału w postaci przetopionego tworzywa sztucznego do momentu uzyskania założonego kształtu. W model wtapiane są kolejne porcje materiału termoplastycznego, który ma zazwyczaj postać cienkiej nitki wykonanej z takiego materiału jak ABS, PLA, PET-G itp. Niejednokrotnie w metodzie tej materiał modelowy jest stosowany naprzemiennie z materiałem podporowym, który jest następnie usuwany [13]. Zaletami produktów wytwarzanych za pomocą FDM są m.in. duża wytrzymałość elementów, niski koszt ich produkcji, możliwość dalszej obróbki mechanicznej, a także szczelność i odporność na działanie wody [14].

Klasyczny druk 3D (oprócz wielu zalet) ma jednak pewne ograniczenia. Większość maszyn do wytwarzania addytywnego porusza się bowiem w układzie kartezjańskim, przez co dysza jest zawsze prostopadła do powierzchni roboczej i porusza się jedynie równoległe do niej. Powoduje to, iż wytwarzane modele budowane są z równoległych względem siebie warstw widocznych po wydruku. W konsekwencji nie ma możliwości przystępnego odwzorowywania różnego rodzaju krzywizn i pochyłości [15]. Dlatego coraz bardziej powszechne staje się *non-planar 3D printing*, zgodnie z którym istnieje możliwość reorientacji głowicy drukującej przez jej pochylenie względem poszczególnych osi układu współrzędnych (rys. 5).

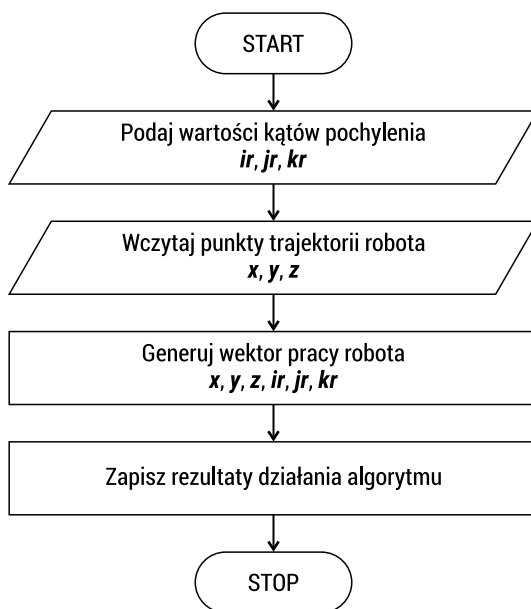


RYS. 5. Porównanie druku: a) technika non-planar 3D printing, b) klasyczny wydruk
ŹRÓDŁO: [15].

Stąd też coraz częściej w procesie druku 3D wykorzystuje się roboty przemysłowe, które dzięki swojej budowie oraz liczbie stopni swobody mogą realizować proces druku w technologii pod kątem (z pochyloną głowicą drukującą), dzięki czemu powstają modele o alternatywnych strukturze i budowie.

4. Algorytm modyfikacji orientacji narzędzia robota

W odpowiedzi na zauważony trend coraz częstszego wykorzystania robotów przemysłowych w procesach wytwarzania addytywnego zaproponowano autorski algorytm, który umożliwia zmianę orientacji narzędzia robota (ekstrudera) w przestrzeni (rys. 6). Algorytm składa się z czterech kroków, wśród których dwa pierwsze odpowiedzialne są za wprowadzenie danych, dwa ostatnie zaś za ich przetworzenie. W pierwszym kroku następuje zdefiniowanie pożądaných przez użytkownika wartości kątów pochylenia ekstrudera robota w przestrzeni względem poszczególnych osi układu współrzędnych. Implementacja tych wartości pozwala na przejście do kroku drugiego – wczytania punktów trajektorii robota. Wspomniane punkty mogą być zdefiniowane bezpośrednio przez użytkownika, generowane na podstawie wzoru matematycznego lub wczytane z plików zewnętrznych (np. z pliku STL). Implementacja wspomnianych danych umożliwia realizację trzeciego i czwartego kroku algorytmu, w których generowany jest wektor pracy robota (łączy w sobie współrzędne punktów trajektorii oraz wartości kątów pochylenia narzędzia robota), zapisane też zostają rezultaty działania algorytmu do pliku tekstowego. Uzyskany plik może być następnie wykorzystany do zaprogramowania robota poprzez implementację w odpowiednim środowisku OLP.



RYS. 6. Zaproponowany algorytm modyfikacji orientacji narzędzia robota przemysłowego w procesie wytwarzania addytywnego

ŹRÓDŁO: opracowanie własne.

W celu weryfikacji opracowanego algorytmu dokonano jego implementacji w środowisku Matlab, a uzyskany w wyniku działania skryptu plik wynikowy posłużył do programowania robota w środowisku RoboDK oraz analizy pracy rzeczywistego urządzenia na autorskim stanowisku zrobotyzowanego druku 3D wyposażonym w robota przemysłowego Kawasaki.

5. Implementacja algorytmu w środowisku Matlab

Struktura zaproponowanego algorytmu posłużyła do opracowania stosownego skryptu w środowisku Matlab. Sporządzony kod źródłowy został przedstawiony na rys. 7.

```
clc; clear;

ir = 45;
jr = -30;
kr = -180;

x = 1:0.2:10;
y = log(1.5*x).*sin(x);
wsp = 50;

LOC = zeros(length(x),6);

format long g
for i = 1:length(x)
    LOC(i,1:end) = [x(i)*wsp round(y(i),2)*wsp 1 ir jr kr];
end

plot(x*wsp,y*wsp,'--o')
title('Wygenerowana krzywa wraz z oznaczeniem punktów')
xlabel('Współrzędna x [mm]')
ylabel('Współrzędna y [mm]')

name = sprintf('loc_test_i%gj%g.txt',LOC(1,4),LOC(1,5));
writematrix(LOC,num2str(name),'Delimiter','tab')
```

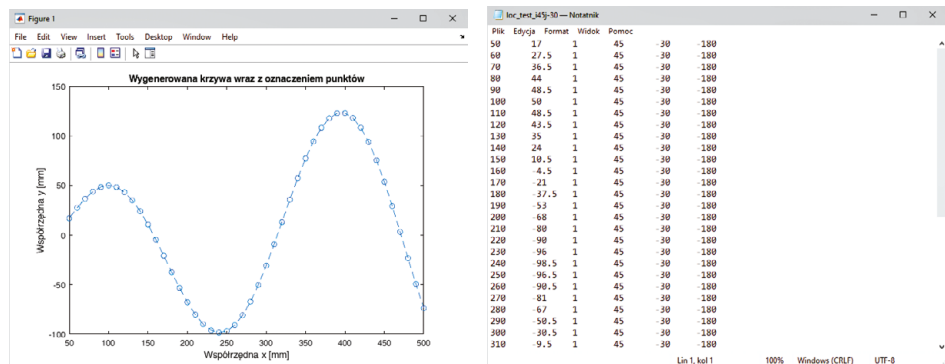
RYS. 7. Kod źródłowy skryptu opracowanego w pakiecie Matlab realizujący zaproponowany algorytm modyfikacji orientacji narzędzia robota przemysłowego

ŹRÓDŁO: opracowanie własne.

W powyższym kodzie użyto typowych instrukcji wykorzystywanych w skryptach opracowywanych w języku Matlab (przygotowania środowiska do pracy, generowania wektorów, realizacji obliczeń itd.). Dodatkowo zastosowano funkcje graficzne, które pozwalają na wykreślenie dowolnego kształtu wraz z kluczowymi punktami krzywej (rys. 8). Ponadto użyto instrukcji pozwalających zapisać współrzędne punktów oraz kątów pochylenia względem osi układu współrzędnych w pliku tekstowym.

Tak opracowany plik może zostać użyty w dalszym procesie programowania robota off-line z wykorzystaniem odpowiednich środowisk. W prezentowanym przykładzie krzywą wygenerowano na podstawie zdefiniowanej w kodzie funkcji matematycznej. Następnie w celu dostosowania krzywej do rozmiaru przestrzeni roboczej robota uzyskane punkty pomnożono przez odpowiedni współczynnik (zmienna *wsp*). Poszczególne kąty rotacji zostały zaś zdefiniowane dzięki wykorzystaniu zmiennych *ir*,

ji oraz *kr*. Wygenerowana krzywa została zapisana w pliku tekstowym, który następnie został użyty w procesie weryfikacji.



RYS. 8. Rezultaty działania opracowanego skryptu

ŹRÓDŁO: opracowanie własne.

6. Weryfikacja opracowanego algorytmu

Zaprezentowane w niniejszej publikacji prace zostały przeprowadzone na stanowisku laboratoryjnym wyposażonym w robota przemysłowego Kawasaki RS003N (rys. 9), który jest przykładem manipulatora, a więc ma za zadanie odwzorowywać ruchy kończyny górnej człowieka. Manipulator przemysłowy jest stacjonarnym układem ramion połączonych ze sobą przegubami, umożliwiającymi ich ruch [16]. Szczegółowa charakterystyka wykorzystanego robota oraz jego kontrolera została podana w tabeli 1.



RYS. 9. Stanowisko laboratoryjne wyposażone w robota Kawasaki RS003N

ŹRÓDŁO: opracowanie własne.

TABELA 1. Specyfikacja robota i kontrolera

Specyfikacja robota	Specyfikacja kontrolera
• Model: RS003N-A • Typ: robot przegubowy • Liczba stopni swobody: 6 • Powtarzalność: $\pm 0,05$ mm • Maksymalne obciążenie: 3 kg • Maksymalna prędkość: 6000 mm/s • Jednostka zasilająca: bezszczotkowy serwonapęd zasilany prądem zmiennym	• Model: E70/E71 • Konstrukcja: samowspierający • Liczba sterowanych osi: 6 • Typ sterowania: teach/repeat • Sposób nauczania: język AS • Napięcie zasilające: 200–240 V (50/60 Hz)

ŹRÓDŁO: [17].

W celu adaptacji robota i budowy stanowiska druku 3D konieczny był odpowiedni dobór jego kluczowych komponentów. Elementy te obejmowały zarówno oprzyrządowanie montowane na flanszy robota (efektor w rozpatrywanym procesie), elementy, na których budowany jest model (stół roboczy ze wszystkimi kluczowymi elementami), jak i oprzyrządowanie sterujące całym procesem wraz z komponentami elektronicznymi. Wykaz głównych komponentów wraz z zalecaną specyfikacją został przedstawiony w tabeli 2.

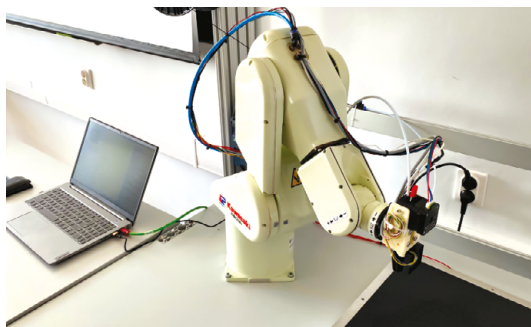
TABELA 2. Komponenty niezbędne do budowy zrobotyzowanego stanowiska druku 3D i modyfikacji robota

Komponent	Specyfikacja
Głowica typu HOTEND	przepływ materiału większy od 30 mm ³ ; możliwość wymiany dyszy; temperatura pracy 350°C; czas nagrzewania poniżej 1 min; średnica 1,75 mm; kompatybilna z materiałami: nylon, PLA, ABS, PETG
Ekstruder	koła napędowe dużej średnicy; dźwignia szybkiego ładowania materiału; dopasowanie do silnika Nema 17; duża siła wypychania materiału
Dysza powlekana	duża zdolność topienia materiału; niklowana; wejście dyszy podzielone na 3 kanały; średnica materiału 1,75 mm; kompatybilna z materiałami nylon, PLA, ABS, PETG.
Płyta główna	procesor ARM Cortex M0 + STM326; wbudowane sterowniki silnika TMS2209; zabezpieczone połączenia termistorowe; port micro USB, zasilanie 24 V
Przełącznik półprzewodnikowy	napięcie pracy 400 V; maksymalny prąd 40 A; prąd sterujący do 20 mA; czas reakcji poniżej 10 ms
Stół roboczy	materiał aluminium; wymiary 450 × 450 × 10 mm
Tacka wydruku	wymiary 406 × 406 mm; temperatura pracy 125°C; kompatybilna z materiałami: nylon, PLA, ABS, PETG; samoprzylepna
Grzałka silikonowa	temperatura pracy 150°C; termistor NTC 100k; moc 1300 W, zasilanie 230V

ŹRÓDŁO: opracowanie własne.

W celu integracji poszczególnych komponentów kluczowe było także zaprojektowanie dodatkowych części. Wykorzystano do tego odpowiednie oprogramowanie CAD, a następnie wytworzono podzespoły za pomocą współczesnych technik wytwarzania.

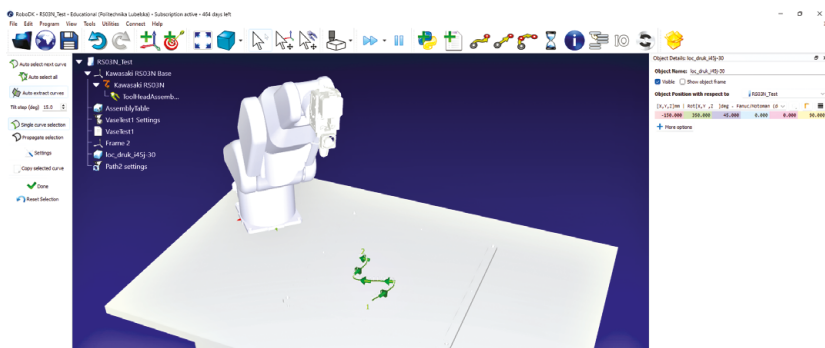
Montaż komponentów o specyfice zgodnej z określonymi wymaganiami pozwolił na zbudowanie stanowiska zrobotyzowanego druku 3D. Poszczególne komponenty elektroniczne zostały zamontowane na szynie i umieszczone na profilach aluminiowych, głowicę drukującą zamontowano na flanszy robota, a stół aluminiowy na odpowiednich śrubach umożliwiających jego wypoziomowanie (rys. 10).



RYS. 10. Stanowisko zrobotyzowanego druku 3D

ŹRÓDŁO: opracowanie własne.

W celu zaprogramowania robotów i weryfikacji algorytmu niezbędne było odpowiednie środowisko programowania robotów off-line, którym w rozpatrywanym przypadku było oprogramowanie RoboDK. Proces programowania robota odbywa się w nim bez wykorzystania rzeczywistego sterownika robota i polega na odpowiedniej konfiguracji stacji roboczej poprzez wybranie robota, narzędzi, zdefiniowania przestrzeni pracy, punktów w przestrzeni oraz innych funkcji (rys. 11). Całość opracowanego programu może być zweryfikowana dzięki opcji symulacji pracy robota [18].

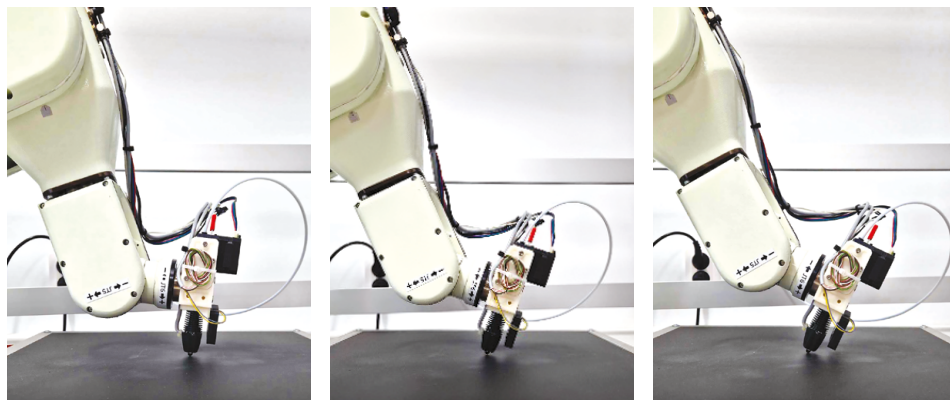


RYS. 11. Odzworowanie stanowiska w środowisku RoboDK

ŹRÓDŁO: opracowanie własne.

Aby zweryfikować powyższe rozwiązanie, rozpatrywaną krzywą trzykrotnie zaimportowano do środowiska, żeby sprawdzić możliwości alternatywnej orientacji punktu TCP robota. Za każdym razem korzystano z wbudowanego narzędzia Curve Follow Project, które wspomagało proces opracowania programu robota.

Programy sterujące robotem zostały następnie przesłane za pomocą konsoli KCwinTCP do rzeczywistego kontrolera robota. Kolejnymi etapami badań były uruchomienie robota w trybie automatycznej pracy i weryfikacja, czy zapisane i zdefiniowane w skrypcie kąty pochylenia są odtwarzane w rzeczywistości (rys. 12).



RYS. 12. Testowanie opracowanych programów robota

ŹRÓDŁO: opracowanie własne.

Podczas weryfikacji opracowanego rozwiązania modyfikowano wartość kąta kr , który przyjmował wartości $kr = 90^\circ$, następnie $kr = 105^\circ$ oraz $kr = 130^\circ$. Za każdym razem robot odpowiednio orientował swoje narzędzie, zachowując zdefiniowany kąt i przemierzając trajektorię zgodnie z założonymi punktami. Proces weryfikacji należy zatem uznać za pozytywny i pozwalający na realizację kolejnych badań, które mogą obejmować budowę struktury przy alternatywnych kątach pochylenia ekstrudera oraz ocenę uzyskanych struktur. W przyszłości planowane są także badania z zakresu budowy modeli z jednoczesną zmianą parametrów kątów w trakcie realizacji procesu wytwarzania.

7. Podsumowanie

Wykorzystanie technologii druku 3D stało się faktem. Rozwiązania, które niegdyś używane były jedynie do prototypowania i realizacji badań, dziś są dostępne praktycznie dla wszystkich. Dlatego też w tym obszarze proponuje się coraz nowsze metody, do których należy m.in. koncepcja *non-planar 3D printing*. W celu realizacji procesu druku 3D zgodnie z tą ideą, a w konsekwencji uzyskiwania wydruków o alternatywnych

właściwościach, coraz częściej stosuje się roboty przemysłowe. Ich zaletą jest bowiem głównie możliwość wykonywania ruchów w wielu płaszczyznach, co wynika z liczby stopni swobody. W niniejszej pracy przedstawiono autorski algorytm modyfikacji kąta pochylenia narzędzia robota w procesie zrobotyzowanego druku 3D. Implementacja zaproponowanego algorytmu w środowisku Matlab, wykorzystanie uzyskanych plików wynikowych w środowisku RoboDK, a także zaimplementowanie kodów sterujących do rzeczywistego robota potwierdziły skuteczność tej koncepcji. Zrealizowane prace będą kontynuowane w dalszych badaniach obejmujących ocenę struktur używanych przy alternatywnych położeniach ekstrudera, a także modyfikację kątów w trakcie realizacji procesu wytwarzania addytywnego.

Literatura

- [1] Domińczuk J., Kost G., Lebkowski P., *Automatyzacja i robotyzacja procesów produkcyjnych*, PWE, Warszawa 2021.
- [2] Gola A., Świć A., *Directions of manufacturing systems' evolution from the flexibility level point of view* [w:] *Innovations in management and production engineering*, red. R. Knosala, Oficyna Wydawnicza Polskiego Towarzystwa Zarządzania Produkcją, Opole 2012, s. 226–238.
- [3] Berg J., Reinhart G., *An Integrated Planning and Programming System for Human-Robot-Cooperation*, „Procedia CIRP” 2017, vol. 63, s. 95–100.
- [4] Gola A., Kost G., Zając J., *Integracja zautomatyzowanych i zrobotyzowanych systemów wytwarzania*, PWE, Warszawa 2022.
- [5] Casalino A., Cividini F., Zanchettin A.M., Piroddi L., Rocco P., *Human-robot collaborative assembly: a use-case application*, „IFAC-PapersOnLine” 2018, vol. 51, no. 11, s. 194–199.
- [6] Sobaszek Ł., Gola A., *Perspective and methods of human-industrial robots cooperation*, „Applied Mechanics and Materials” 2015, vol. 791, s. 178–183.
- [7] Wiechetek Ł., Gola A., *Agile manufacturing and commerce. The impact of 3D printing on markets and business processes*, „Przedsiębiorczość i Zarządzanie” 2018, vol. 19, no. 5, s. 99–116.
- [8] RoboDK, strona internetowa, www.robodk.com [dostęp: 22.04.2024].
- [9] Borys S., *Komputerowe wspomaganie projektowania zrobotyzowanych komór produkcyjnych – stanowisko do lakierowania karoserii samochodowej*, „Mechanik” 2017, vol. 87, no. 7, s. 51–58.
- [10] *Zaczynij efektywnie spawać z robotami Kawasaki Robotics*, Astor, www.astor.com.pl/rozwi-zania/systemy-zrobotyzowane/zrobotyzowane-spawanie.html [dostęp: 28.12.2023].
- [11] *KUKA robot mills oversized plastic pipes*, Kuka, www.kuka.com/pl-pl/firma/prasa/news/2016/09/kuka-robot-mills-oversized-plastic-pipes [dostęp: 28.12.2023].
- [12] Kmošek J., *3D printing in Automotive – How Škoda Auto made it*, www.blog.prusa3d.com/3d-printing-in-skoda-auto_73147 [dostęp: 28.12.2023].
- [13] Micielica M., *Techniki szybkiego prototypowania – Rapid Prototyping*, „Przegląd Mechaniczny” 2010, nr 2, s. 39–45.
- [14] Chua C.K., Leong K.F., *Rapid Prototyping: Principles and Applications in Manufacturing*, World Scientific 2000.
- [15] O’Connell J., *Non-Planar 3D Printing: All You Need to Know*, All3DP 2023.
- [16] Honczarenko J., *Roboty przemysłowe. Budowa i zastosowanie*, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa 2004.

- [17] Kawasaki Heavy Industries Ltd., *Kawasaki Robot Materials – RS003NFE70 – Robot Specification*.
- [18] Konopka P., *RoboDK – czyli nowe podejście do programowania robotów przemysłowych*, DPS Today, www.dpstoday.pl/robodk-czyli-nowe-podejscie-do-programowania-robotow [dostęp: 28.12.2023].

Wpływ temperatury na pracę ogniwa słonecznego

Aleksandra Gąska, Wiktoria Malinowska, Mikołaj Sieńko, Łukasz Popławski

Politechnika Lubelska, Koło Naukowe Energetyki Odnawialnej „Grupa Ogniwo”

s95124@pollub.edu.pl

Summary: The article explains the problem of converting solar energy to electricity in the photovoltaic effect and discusses the characteristics of the performance of a solar cell. The focus was on the effect of temperature on the performance of the cell. Analysis of the data showed the negative influence of an increase in temperature on cell performance. The observed voltage drop significantly reduces the efficiency and accelerated degradation of photovoltaic cells. Methods for their cooling were considered and new generations of cells were described, as well as innovative technologies that reduce the impact of high temperatures on the PV module's efficiency.

Keywords: temperature, photovoltaic, performance of pv systems

1. Wstęp

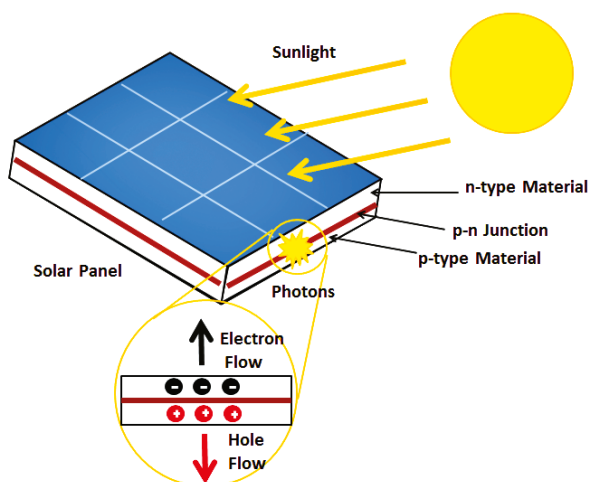
Członkowie Studenckiego Koła Naukowego Energetyki Odnawialnej „Grupa Ogniwo” w niniejszej publikacji przeanalizowali wpływ temperatury na efektywność ogniwa słonecznego. Omówili podstawy fotowoltaiki, m.in. strukturę ogniw i parametry, szczególnie wyjaśniając ich znaczenie. Sednem pracy są wyniki przeprowadzonych badań na farmie fotowoltaicznej, które prezentują wpływ temperatury na parametry ogniw różnych generacji, a następnie ich zestawienie z teoretycznymi wartościami podanymi przez producentów. Omówiono także praktyczne aspekty zarządzania temperaturą w systemach fotowoltaicznych. Autorzy przedstawiają różnorodne metody ograniczania negatywnego wpływu temperatury, w tym technologie chłodzenia oraz sposoby zwiększania odporności ogniw na działanie wysokich temperatur.

2. Wstęp do fotowoltaiki

We wprowadzeniu przedstawiono pojęcia występujące w dalszej części pracy, mianowicie parametry oraz zjawiska stojące za przemianą energii promieniowania słonecznego na energię elektryczną.

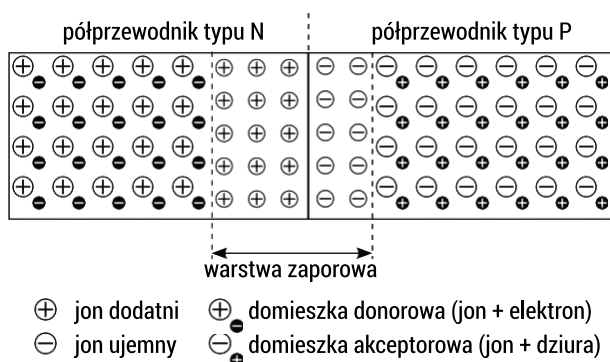
3. Efekt fotowoltaiczny

Proces zachodzący w modułach, który polega na generowaniu napięcia i przepływu prądu elektrycznego w strukturze półprzewodnika pod wpływem promieniowania słonecznego, nazywany jest efektem fotowoltaicznym.



RYS. 1. Efekt fotowoltaiczny

ŹRÓDŁO: [10].



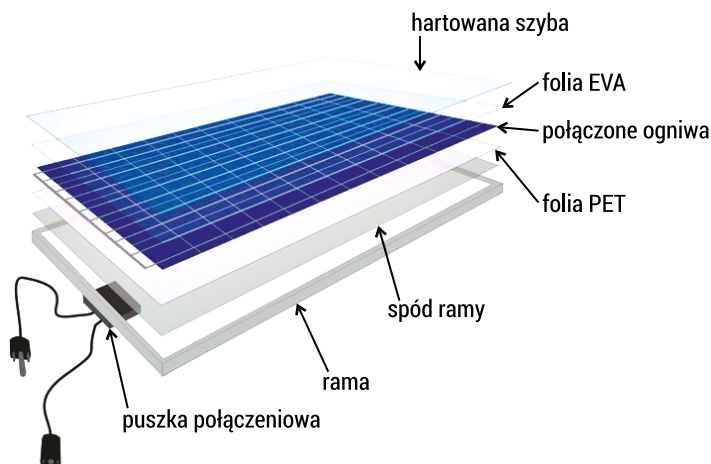
RYS. 2. Złącze p-n

ŹRÓDŁO: [9].

Zjawisko to występuje w ogniwach fotowoltaicznych, które składają się z półprzewodnika typu N (domieszkowanego donorowo) oraz półprzewodnika typu P (domieszkowanego akceptorowo). Materiały te są ze sobą połączone i tworzą złącze p-n, którego rolą jest rozdzielenie ładunków i powstanie pola elektrycznego [15].

4. Budowa modułów fotowoltaicznych

Moduły fotowoltaiczne zazwyczaj składają się z indywidualnych ogniw, które przyjmują postać cienkich waflí o grubości około 2 mm. W przypadku ogniw pierwszej generacji są one produkowane z mono- lub polikrystalicznego krzemu i nadal dominują na rynku. Ich następcami są ogniwa drugiej generacji, w których materiał półprzewodnikowy jest nanoszony w formie cienkiej warstwy. Często używane są materiały różne od krzemu, takie jak tellurek kadmu (CdTe) czy kryształ, w którego skład wchodzi ind, gal i selen w odpowiednich proporcjach (CIGS). Połączone ze sobą ogniwa pokrywane są warstwą antyrefleksyjną oraz folią EVA, a następnie całość jest przykrywana szybą z hartowanego szkła. Całość konstrukcji otoczona jest aluminiową ramą. Tył modułu nie bierze udziału w produkcji energii, umieszczone są w nim folia PET, spód ramy oraz puszka przyłączeniowa, która pozwala łączyć moduły ze sobą i innymi urządzeniami [5, 11].



RYS. 3. Budowa modułu fotowoltaicznego I generacji

ŹRÓDŁO: [11].

5. STC i NOCT

STC (*Standard Test Conditions*) i NOCT (*Nominal Operating Cell Temperature*) to dwa standardowe zestawy warunków, które są używane do oceny i porównywania wydajności modułów fotowoltaicznych.

Do warunków STC należą:

- natężenie promieniowania słonecznego: 1000 W/m^2 ,
- temperatura ogniwa słonecznego: 25°C ,
- masa powietrza: AM 1,5 (Air Mass 1,5).

Powyższe warunki są sztucznie stworzonymi warunkami laboratoryjnymi, które mają na celu umożliwienie porównywania różnych modułów fotowoltaicznych w kontrolowanych warunkach [7].

Wśród warunków NOCT znajdują się:

- natężenie promieniowania słonecznego: 800 W/m^2 ,
- temperatura otoczenia: 20°C ,
- prędkość wiatru: 1 m/s ,
- masa powietrza: AM 1,5.

Bardziej realistycznym zestawem warunków jest NOCT, który odzwierciedla typowe warunki pracy paneli fotowoltaicznych na zewnątrz [7].

6. Wpływ temperatury na parametry pracy ogniwa

Wpływ temperatury na parametry pracy ogniwa fotowoltaicznego jest istotnym aspektem, który może znacząco oddziaływać na efektywność i wydajność konwersji energii słonecznej na energię elektryczną. Wzrost temperatury ogniwa powoduje nasilenie poszczególnych procesów odbywających się w jego wnętrzu. Jedną z ważnych kwestii jest zwiększenie się ruchliwości termicznej, czyli zdolności cząsteczek do przemieszczania się pod wpływem energii termicznej w materiale. Wraz ze wzrostem temperatury elektrony i dziury wewnątrz ogniwa uzyskują dodatkową energię kinetyczną, co powoduje, że przemieszczają się coraz szybciej. Ma to bezpośredni wpływ na intensywniejszą dyfuzję nośników ładunku oraz zwiększenie się liczby rekombinacji w ogniwie. Zmniejszenie się przerwy energetycznej, która oddziela pasmo walencyjne od pasma przewodnictwa, to kolejne zjawisko powodowane wzrostem temperatury, ponieważ struktura krystaliczna krzemu się rozszerza. Gdy temperatura rośnie, wartość tej przerwy będzie maleć. Ponadto wyższa energia kinetyczna elektronów powoduje, że łatwiej mogą one przekraczać przerwę energetyczną. Innym czynnikiem wpływającym na wydajność jest występowanie w ogniwie oporów wewnętrznych, które przyczyniają się do większych strat energii w postaci ciepła oraz zmniejszenia efektywności konwersji poprzez rozpraszanie mocy [4].

7. Napięcie obwodu otwartego

Wzrost temperatury prowadzi do zwiększenia liczby rekombinacji w ogniwie, podczas której nośniki ładunku neutralizują się i tracą swoją energię. Skutkiem tego jest zmniejszenie liczby nośników energii biorących udział w generowaniu prądu przez ogniwo, co wpływa na wartość prądu nasycenia w ogniwie. Im mniej nośników ładunku, tym bardziej zmniejsza się wartość napięcia obwodu otwartego, ponieważ wytwarzanie napięcia zależy od liczby aktywnych nośników w ogniwie [15].

8. Prąd zwarcia

Wzrost temperatury może prowadzić do zwiększenia wartości prądu zwarcia, co jest związane z większą aktywnością termiczną ładunków w materiale półprzewodnikowym. Prąd zwarcia w ogniwie fotowoltaicznym występuje, gdy napięcie generowane w ogniwie jest równe 0. Na charakterystyce prądowo-napięciowej ogniwa widać odwrotną proporcjonalność między napięciem a natężeniem prądu. Im niższe napięcie, tym wyższe natężenie prądu, dlatego wzrost temperatury, który prowadzi do spadku napięcia, wpływa również na niewielki wzrost wartości prądu zwarcia [15].

9. Punkt mocy maksymalnej

W wyniku znacznego zmniejszania się wartości napięcia przy stosunkowo niewielkim wzroście natężenia wraz ze wzrostem temperatury zauważalne jest przesunięcie punktu mocy maksymalnej w kierunku wartości niższych od wartości nominalnych. Oznacza to, że ogniwa fotowoltaiczne generują mniej mocy przy danym obciążeniu [7].

10. Współczynnik wypełnienia

Współczynnik wypełnienia jest miarą stosunku mocy maksymalnej generowanej przez ogniwo do jego mocy idealnej, która jest iloczynem prądu zwarcia oraz napięcia obwodu otwartego. W związku z tym wzrost temperatury, który prowadzi do obniżenia wartości punktu mocy maksymalnej, będzie również wpływał na stopień wykorzystania dostępnej w ogniwie mocy [7].

11. Sprawność

Wzrost temperatury może wpływać negatywnie na efektywność ogniw fotowoltaicznych. Sprawność fotowoltaiczna to stosunek maksymalnej mocy elektrycznej do iloczynu powierzchni ogniwa i docierającego promieniowania słonecznego, więc jest ona związana z punktem mocy maksymalnej. Wysoka temperatura może przyspieszać

procesy degradacji materiałów wewnątrz ogniwa fotowoltaicznego, co może prowadzić do zmniejszenia jego trwałości i efektywności w dłuższej perspektywie czasowej. W obszarach o dużym nasłonecznieniu, gdzie moduły fotowoltaiczne są blisko siebie, może wystąpić efekt cienia termicznego, w którym moduły fotowoltaiczne ogrzewają się wzajemnie. To dodatkowo zwiększa temperaturę, co wpływa negatywnie na wydajność [16].

12. Badania wpływu temperatury na instalację fotowoltaiczną zlokalizowaną w województwie lubelskim

W niniejszym rozdziale przedstawiono szczegółową analizę badań temperatury ogniw fotowoltaicznych na farmie fotowoltaicznej w Bordziłówce w województwie lubelskim. Projekt ten, przeprowadzony przez studentów Koła Naukowego Energetyki Odnawialnej Politechniki Lubelskiej „Grupa Ogniwo”, został sfinansowany z konkursu na projekty studenckie dla kół naukowych Politechniki Lubelskiej. Skupiono się w nim na analizie wydajności systemu fotowoltaicznego złożonego z modułów w technologii pierwszej i drugiej generacji, działającego od 2015 r.

Badanie obejmowało pomiar temperatury otoczenia, modułów, prędkości wiatru oraz natężenia promieniowania słonecznego w płaszczyźnie modułów.

TABELA 1. Urządzenia wykorzystane do pomiarów

Urządzenie	Model	Zakres	Dokładność
Miernik promieniowania słonecznego	Fluke FLK-IRR1-SOL	100–1400 W/m ²	± (5% + 5)
Czujnik temperatury	PeakTech P5180	–200–1300°C	± (0,15% + 1)
Rejestrator prędkości wiatru	UT363	0–30 m/s	± (5% + 0,5)

ŹRÓDŁO: opracowanie własne.

W kontekście badań nad energią słoneczną i oceny modułów fotowoltaicznych dokładny pomiar promieniowania słonecznego jest kluczowy dla precyzyjnej oceny wydajności. Miernik promieniowania słonecznego został starannie zamocowany do tej samej aluminiowej szyny, na której umieszczono badany moduł fotowoltaiczny. Takie rozmieszczenie zapewnia, że ogniwo referencyjne w urządzeniu pomiarowym jest ustawione pod identycznym kątem nachylenia względem poziomu co badany moduł (rys. 4).



RYS. 4. Miernik temperatury przymocowany do szyny fotowoltaicznej

ŹRÓDŁO: opracowanie własne.

W celu uzyskania precyzyjnych pomiarów temperatury ogniw fotowoltaicznych czujnik temperatury wyposażony w termoparę został zainstalowany na tylnej powierzchni badanego modułu fotowoltaicznego, aby uniknąć potencjalnych negatywnych efektów, m.in. powstania małych zacienień na ogniwach, co mogłoby obniżyć efektywność produkcji energii elektrycznej (rys. 5).



RYS. 5. Montaż czujnika temperatury modułu fotowoltaicznego

ŹRÓDŁO: opracowanie własne.

Pomiary prędkości wiatru zostały przeprowadzone za pomocą anemometru UT363, który charakteryzuje się zakresem pomiarowym od 0 do 30 m/s. Te pomiary zostały wykonane na tej samej wysokości, na której zamontowano moduły fotowoltaiczne, ponieważ wartości prędkości wiatru mogą znacznie się różnić na różnych wysokościach. Znaczenie tych pomiarów polega na tym, że prędkość wiatru ma bezpośredni wpływ na temperaturę ogniw fotowoltaicznych, będącą jednym z kluczowych parametrów wpływających na wydajność pracy modułu fotowoltaicznego (rys. 6).



RYS. 6. Pomiar prędkości wiatru

ŹRÓDŁO: opracowanie własne.

TABELA 2. Dane pomiarowe uzyskane z modułów fotowoltaicznych technologii CdTe

Natężenie promieniowania [$\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$]	Prędkość wiatru [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$]	Temperatura modułu [$^{\circ}\text{C}$]	Temperatura NOCT [$^{\circ}\text{C}$]	Różnica [$^{\circ}\text{C}$]
950	0	48,3	57,69	9,39
910	1,3	48,7	55,84	7,14
611	1,5	48,3	45,89	2,41
630	1,5	46,5	45,69	0,81
666	0	46,9	47,11	0,21
703	0,4	46,4	48,17	1,77
664	0	46,2	46,85	0,65
761	0	46,1	48,88	2,78
752	2,5	44,7	49,00	4,30
1015	0,8	46,2	58,52	12,32
993	1,3	46,7	57,13	10,43
936	0,3	47,4	55,75	8,35
962	1,5	48,0	57,06	9,06
944	1,1	48,9	56,30	7,40
942	0,4	49,0	55,54	6,54
947	1,1	49,6	56,39	6,79
942	1,3	50,4	56,84	6,44

Natężenie promieniowania [$\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$]	Prędkość wiatru [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$]	Temperatura modułu [$^{\circ}\text{C}$]	Temperatura NOCT [$^{\circ}\text{C}$]	Różnica [$^{\circ}\text{C}$]
940	1,6	50,5	55,68	5,18
936	1,9	49,9	55,15	5,25
934	0,4	50,4	55,49	5,09
935	1	50,7	55,82	5,12
938	1,4	50,7	55,71	5,01
937	0,8	51,7	56,28	4,58
936	0,4	52,2	56,05	3,85
937	0,8	52,2	55,48	3,28
942	1,7	52,0	55,74	3,74
943	1,1	51,9	56,17	4,27
944	1,7	51,7	56,30	4,60
946	2,7	51,3	56,16	4,86
948	1,7	50,9	56,33	5,43
965	1,6	51,1	56,56	5,46
972	2	51,9	57,08	5,18
974	1,5	51,8	57,74	5,94

ŹRÓDŁO: opracowanie własne.

TABELA 3. Dane pomiarowe uzyskane z modułów fotowoltaicznych technologii krzemu amorficznego

Natężenie promieniowania [$\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$]	Prędkość wiatru [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$]	Temperatura modułu [$^{\circ}\text{C}$]	Temperatura NOCT [$^{\circ}\text{C}$]	Różnica [$^{\circ}\text{C}$]
1100	2,9	43,5	62,08	18,58
1079	3	39,4	61,42	22,02
1094	3,2	39,4	61,89	22,49
1099	0	40,5	61,04	20,54
1079	0	41,9	60,42	18,52
970	2,6	39,3	57,21	17,91
860	3	39,2	53,78	14,58
860	1,6	38,0	53,48	15,48
1056	2,2	38,4	59,90	21,50
1154	0	39,6	62,96	23,36
1160	2,5	40,3	63,45	23,15
1136	0,8	40,8	62,20	21,40
1134	0	41,8	61,84	20,04

Natężenie promieniowania [$\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$]	Prędkość wiatru [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$]	Temperatura modułu [$^{\circ}\text{C}$]	Temperatura NOCT [$^{\circ}\text{C}$]	Różnica [$^{\circ}\text{C}$]
960	0	42,2	55,60	13,40
1030	0	33,1	58,59	25,49
1016	0	34,5	57,85	23,35
970	0	37,8	57,01	19,21
1019	0	39,0	58,44	19,44
1025	0	40,4	58,83	18,43
1024	3,3	41,4	58,90	17,50
1027	1,9	43,2	59,19	15,99
1020	2,1	44,3	58,58	14,28
994	1,1	45,1	58,16	13,06
1036	1	45,2	59,58	14,38
1020	0	46,2	59,28	13,08

ŹRÓDŁO: opracowanie własne.

TABELA 4. Dane pomiarowe uzyskane z modułów fotowoltaicznych technologii CIS

Natężenie promieniowania [$\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$]	Prędkość wiatru [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$]	Temperatura modułu [$^{\circ}\text{C}$]	Temperatura NOCT [$^{\circ}\text{C}$]	Różnica [$^{\circ}\text{C}$]
932	2,1	47,2	58,46	11,26
937	1,6	47,4	58,62	11,22
934	1,9	46,8	58,42	11,62
935	0	49,6	58,76	9,16
933	0	49,2	58,79	9,59
937	0	49,5	60,12	10,62
941	0	47,1	57,66	10,56
940	0	49,8	59,43	9,63
943	0,4	49,3	60,13	10,83
940	0	50,5	60,33	9,83
940	0	51,2	59,83	8,63
940	0	49,6	59,13	9,53
941	1,4	49,6	58,56	8,96
939	0	50,5	60,39	9,89
943	0	51,1	60,83	9,73
946	0,4	50,9	59,93	9,03
950	0,4	49,4	61,16	11,76
952	0	50	59,83	9,83

Natężenie promieniowania [$\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$]	Prędkość wiatru [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$]	Temperatura modułu [$^{\circ}\text{C}$]	Temperatura NOCT [$^{\circ}\text{C}$]	Różnica [$^{\circ}\text{C}$]
963	0,4	51,4	60,50	9,10
967	0	52,1	58,64	6,54
970	0	46,1	61,84	15,74
989	1,1	46,9	60,78	13,88
963	0	49,8	60,20	10,40
971	0,4	49,9	61,37	11,47
981	1,2	49,4	61,71	12,31
580	1,1	50,1	48,68	1,43
961	0	51,6	60,83	9,23
954	0,8	48,8	59,10	10,30
958	1,4	50,8	60,03	9,23
959	1,1	47,5	60,37	12,87
906	2,7	46,1	57,08	10,98

ŹRÓDŁO: opracowanie własne.

TABELA 5. Dane pomiarowe uzyskane z modułów fotowoltaicznych technologii polikrystalicznego krzemu

Natężenie promieniowania [$\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$]	Prędkość wiatru [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$]	Temperatura modułu [$^{\circ}\text{C}$]	Temperatura NOCT [$^{\circ}\text{C}$]	Różnica [$^{\circ}\text{C}$]
1027	1	40,8	58,69	17,89
895	0	42,7	54,47	11,77
978	0	42,1	57,16	15,06
990	1,6	43,6	59,24	15,64
995	0	45,3	58,49	13,19
1006	0	47,0	60,04	13,04
1000	0	48,4	59,05	10,65
968	3	48,7	57,95	9,25

ŹRÓDŁO: opracowanie własne.

Dane dotyczące generowanej mocy i uzyskanej energii, wartości po stronie DC (prąd stały), zostały odczytane z falownika. Na tej podstawie wyznaczono parametry charakterystyczne systemu PV, takie jak uzysk referencyjny, uzysk po stronie DC oraz współczynnik wydajności.

Analiza danych wykazała znaczące różnice w sprawności i temperaturze pracy modułów różnych technologii.

TABELA 6. Technologie badanych modułów fotowoltaicznych

Technologia	Moc	Sprawność (STC)	Sprawność odnotowana
CdTe	75 W	0,1042	0,034
CIS	155 W	0,126	0,114
a-Si	95 W	0,0603	0,046
pc-Si	250 W	0,1537	0,118

ŹRÓDŁO: opracowanie własne.

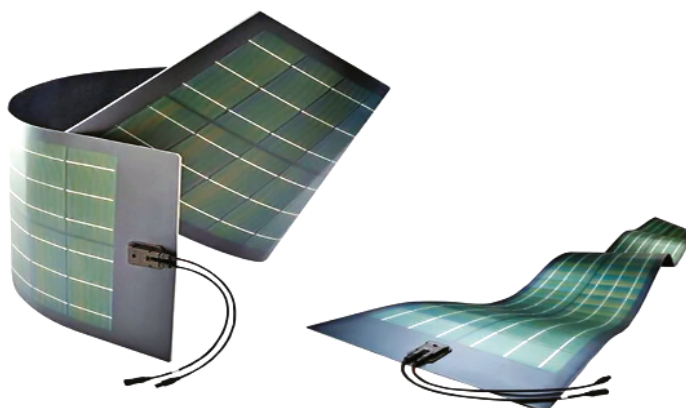
13. Wyniki badań

W przypadku technologii cienkowarstwowej CdTe odnotowano wydajność w przeliczeniu do STC równą 3,4%. Sprawności pozostałych technologii wynosiły: CIS – 11,4%, krzem amorficzny (a-Si) – 4,6%, krzem polikrystaliczny (pc-Si) – 11,8%. Wyniki te porównano z teoretycznymi wartościami podanymi przez producentów oraz z uwzględnieniem warunków atmosferycznych w trakcie pomiaru. Badania temperatur modułów pozwoliły przyrównać je do teoretycznej pracy modułu w warunkach NOCT. Najniższe temperatury teoretyczne zaobserwowano dla modułów z telurku kadmu (CdTe), które oscylowały w granicach 50–56°C. Dla technologii CIS, krzemu amorficznego (a-Si) oraz polikrystalicznego krzemu (pc-Si) różnice temperatur wynosiły odpowiednio około 10°C, 15°C i 10°C. Przeprowadzone badania dostarczyły cennych informacji o spadku sprawności modułów fotowoltaicznych w różnych warunkach atmosferycznych, m.in. pod wpływem działania wysokich temperatur na ogniwa fotowoltaiczne.

14. Metody zmniejszenia wpływu temperatury na pracę ogniwa

W niniejszym podrozdziale opisano sposoby zmniejszenia wpływu temperatury na pracę ogniwa. Z powyższych treści wiadomo, że wysoka temperatura ma negatywny wpływ na wydajność ogniwa. Poniżej przedstawiono sposoby, jak zwiększyć odporność na temperaturę.

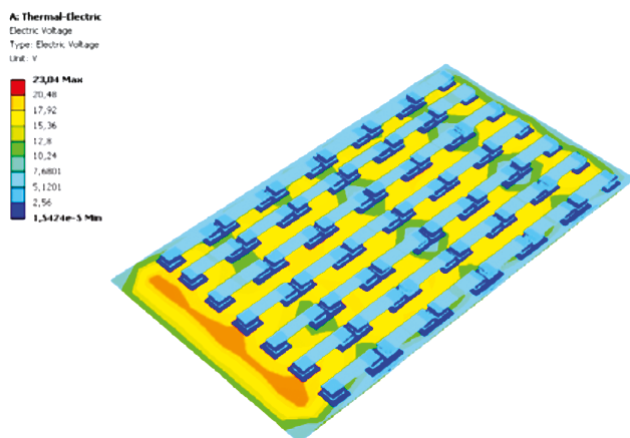
Ogniwa II generacji (np. CdTe, CIGS, CIS) wykorzystują cienkie warstwy półprzewodnikowych materiałów do przekształcenia energii słonecznej w energię elektryczną. Charakteryzują się lepszą odpornością na wpływ temperatury. Są zazwyczaj bardziej elastyczne i lżejsze niż ogniwa krzemowe, ale mają niższą wydajność.



RYS. 7. Ogniwo cienkowarstwowe

ŹRÓDŁO: [12].

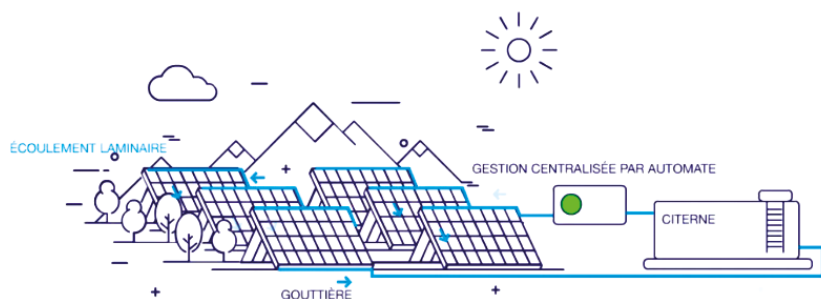
Jednym ze sposobów zmniejszenia wpływu temperatury na pracę ogniwa jest zastosowanie hybrydowych paneli słonecznych, które są chłodzone powietrzem lub innym czynnikiem, takim jak glikol. Redukcja temperatury powierzchni ogniwa fotowoltaicznego podnosi jego wydajność. Ciepło przekazywane do czynnika może zostać wykorzystane np. w instalacji ogrzewania ciepłej wody [8].



RYS. 8. Temperatura ogniwa w zależności od prędkości wiatru w radiatorze

ŹRÓDŁO: [8].

Kolejną metodą zmniejszenia wpływu temperatury na pracę ogniwa jest zastosowanie technologii chłodzenia obiegiem wody. Polega ona na umieszczeniu na krawędziach modułu specjalnych rurek wyposażonych w drobne otwory, przez które spływa zgromadzona woda deszczowa, chłodząc powierzchnię ogniwa.



RYS. 9. Technologia chłodzenia obiegiem wody

ŹRÓDŁO: [13].

Ostatnią propozycją zmniejszenia wpływu temperatury na pracę ogniwa jest umieszczenie modułów na wodzie. Taka lokalizacja pozwala wykorzystać stałą i relatywnie niską temperaturę w zbiorniku, co może zwiększyć uzysk aż o 10%. Ponadto nad zbiornikami unosi się mniej kurzu i pyłów niż na gruncie lub dachu, co prowadzi do mniejszych zanieczyszczeń modułów i lepszej ich pracy.



RYS. 10. Moduły ustawione na wodzie

ŹRÓDŁO: [14].

15. Podsumowanie

Przeprowadzone analizy dostarczyły istotnych danych dotyczących zmniejszenia efektywności modułów fotowoltaicznych w różnych warunkach atmosferycznych, w tym wpływu wysokich temperatur na wydajność ogniw fotowoltaicznych. Temperatura znacząco oddziałuje na konwersję energii przez ogniwa fotowoltaiczne i powoduje

znaczne spadki sprawności instalacji. Traci na tym również światowy rynek energetyczny, który stawia na rozwój energii pozyskiwanej ze słońca. W obliczu rosnących globalnie temperatur oraz zmian klimatycznych należy poszukiwać rozwiązań, które zminimalizują negatywny wpływ temperatury na działanie ogniw w instalacjach fotowoltaicznych.

Literatura

- [1] Frydrychowicz-Jastrzębska G., *Ogniwa słoneczne: budowa, technologia i zastosowanie*, Wydawnictwa Komunikacji i Łączności, Warszawa 2014.
- [2] Jarmuda T., Mikulski S., *Symulacja stochastycznych zmian irradiancji na powierzchni modułów PBV w środowisku Matlab & Simulink* [w:] *Między ewolucją a rewolucją. W poszukiwaniu strategii energetycznej*, t. 2: *Zrównoważony rozwój, OZE, elektroenergetyka, prawo, ochrona środowiska, ekologia, biomasa, odpady komunalne*, red. J. Maj, P. Kwiatkiewicz, R. Szczerbowski i in., Wydawnictwo Fundacja na rzecz Czystej Energii, Poznań 2015, s. 39.
- [3] Jaskólkowski W., Wiatr J., *Instalacje fotowoltaiczne. Podstawy fizyczne działania. Ochrona odgromowa. Zasady neutralizacji zagrożeń porażenia prądem elektrycznym w czasie pożaru*, „Zeszyty Naukowe SGSP” 2016, nr 59/3, s. 71–99.
- [4] Jarzębski Z., *Energia słoneczna. Konwersja fotowoltaiczna*, PWN, Warszawa 1990.
- [5] Olchowik M., *Cienkie warstwy w strukturach baterii słonecznych*, Wydawnictwo Politechniki Lubelskiej, Lublin 2006.
- [6] Stryczewska H., *Energie odnawialne. Przegląd technologii i zastosowań*, Lublin 2012.
- [7] Tytko R., *Urządzenia i systemy energetyki odnawialnej*, Wydawnictwo i Drukarnia Towarzystwa Słowaków w Polsce, Kraków 2021.
- [8] Wodołański A., *Numeryczna analiza poprawy wydajności hybryd PV/TEG chłodzonych pasywnym przepływem powietrza*, „Przegląd Elektrotechniczny” 2021, nr 2, s. 20–23.
- [9] *Niespolaryzowane złącze p-n*, Wikimedia, <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Zlaczepn-niespolaryzowane.svg> [dostęp: 20.11.2023].
- [10] *Photovoltaic effect*, https://energyeducation.ca/encyclopedia/Photovoltaic_effect#cite_note-3 [dostęp: 20.11.2023].
- [11] *Moduły fotowoltaiczne – rodzaje, cechy charakterystyczne*, Globenergia, <https://globenergia.pl/moduly-fotowoltaiczne-i-generacji/> [dostęp: 20.11.2023].
- [12] DS New Energy, <https://dsisolar.com/solar-panel/cigs-solar-module-panel-solar-module> [dostęp: 20.11.2023].
- [13] Sunbooster, <https://sunbooster.fr> [dostęp: 20.11.2023].
- [14] Energa, <https://media.energa.pl> [dostęp: 20.11.2023].
- [15] Gołek F., *Fizyczne podstawy komunikacji*, projekt „Rozwój potencjału i oferty edukacyjnej Uniwersytetu Wrocławskiego szansą zwiększenia konkurencyjności Uczelni” współfinansowany ze środków Unii Europejskiej w ramach Europejskiego Funduszu Społecznego.
- [16] Mazur M., Partyka J., Marcewicz T., *Wpływ temperatury na sprawność baterii słonecznych*, „Przegląd Elektrotechniczny” 2016, nr 8, s. 109–112.

Doskonalenie systemu logistycznego na przykładzie Grupy Aliplast

Izabela Bobel, Michał Gruszka, Klaudia Baran, Martyna Majchrzak, Monika Kulisz

Politechnika Lubelska, Koło Naukowe Zarządzania Produkcją

s97924@pollub.edu.pl

Summary: In the study, the authors present suggestions for improving the logistics system using Aliplast Group as a case study. The research, conducted through observational methods, allowed the identification of problems within the company, including insufficient space for packing finished products, suboptimal placement of packing areas, and inefficient use of warehouse space. Suggested solutions include centralizing the packing area, creating a finished goods warehouse, and restructuring existing warehouses to improve the company's logistics system.

Key words: Logistic System, Process, Process Improvement, Production, Warehousing

1. Wstęp

W dynamicznie zmieniającym się świecie gospodarczym logistyka stała się kluczowym elementem zapewniającym skuteczność i konkurencyjność przedsiębiorstw. Centralnym aspektem efektywnej logistyki jest zintegrowane zarządzanie, które łączy różne segmenty łańcucha dostaw w spójną całość [4, 7, 9].

Według Gołębskiej logistyka nie jest statycznym zestawem praktyk, lecz dynamicznym procesem, który musi ciągle się adaptować do nowych wyzwań i warunków rynkowych [5]. Elementy takie jak zarządzanie przepływem materiałów, usług i informacji, jak podkreśla m.in. Pfohl, są istotne w tworzeniu wydajnych systemów logistycznych [14, 16]. Logistyka odgrywa kluczową rolę w zapewnianiu efektywnej operacji i satysfakcji klientów [13]. Skuteczne procesy logistyczne są niezwykle ważne dla ciągłego przepływu produktów od dostawców do konsumentów końcowych, wpływając na utrzymanie klientów i przyciąganie nowych [12, 17].

Przyglądając się konkretnym przypadkom z literatury, można zauważyć, że realia operacyjne wymagają elastyczności i innowacyjności. Kubański zwraca uwagę na znaczenie systemów logistycznych w kontekście technologicznym i ich wpływ na funkcjonowanie całego łańcucha dostaw [10]. Przykład ten ilustruje, jak praktyczne zastosowanie teorii logistycznych może się przyczynić do znaczącej poprawy efektywności operacyjnej. Integracja technologii z zarządzaniem logistyką może zwiększyć automatyzację oraz jakość procesów przy jednoczesnym wykorzystaniu doświadczeń uczestników łańcucha logistycznego [6, 8, 11].

Doskonalenie systemów logistycznych wymaga nie tylko zrozumienia podstawowych zasad logistyki, lecz także umiejętności ich adaptacji do specyficznych warunków i potrzeb przedsiębiorstwa [1, 3, 15]. W analizowanym studium przypadku adaptacja ta jest kluczowa dla osiągnięcia optymalizacji procesów.

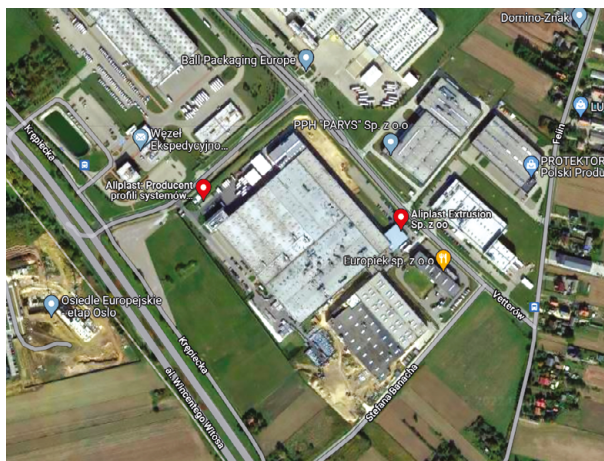
Doskonalenie systemu logistycznego, oparte na solidnych teoretycznych fundamentach i elastyczności w praktycznym zastosowaniu, jest niezbędne, by osiągnąć cele biznesowe w dzisiejszym szybko zmieniającym się świecie gospodarczym. Analizując konkretny przypadek, przedstawiono, jak teoria może zostać skutecznie przekształcona w praktykę i prowadzić do znaczących ulepszeń w procesach logistycznych przedsiębiorstwa. W niniejszym artykule skoncentrowano się na doskonaleniu systemów logistycznych, biorąc pod uwagę teorię i praktykę na przykładzie Grupy Aliplast. Celem prowadzonych badań była próba optymalizacji jej procesów logistycznych. Wykorzystano metodę analizy i wnioskowania, a także technikę obserwacji uczestniczącej, co pozwoliło na zrozumienie wewnętrznych procesów logistycznych przedsiębiorstwa. Postawiony problem badawczy brzmiał: w jaki sposób usprawnić procesy logistyczne podmiotu badanego. Dodatkowo weryfikacji poddano hipotezę zakładającą, że optymalizacja procesów logistycznych Grupy Aliplast przyczyni się do eliminacji bieżących problemów operacyjnych, a także zwiększy efektywność przedsiębiorstwa.

2. Obiekt badań

Grupa Aliplast, która stanowi integralną część globalnego koncernu Corialis, odgrywa kluczową rolę na rynku profili aluminiowych, oferując szeroką gamę produktów dla różnorodnych branż. Mimo że składa się z dwóch przedsiębiorstw, Aliplast Extrusion Sp. z o.o. oraz Aliplast Sp. z o.o., działa jako jedna entność w ramach Corialis. Współpracuje również z innymi firmami z grupy, takimi jak Aliplast Aluminium Extrusion, Profils Systems, Lingote-Aluminios, Smart Aluminium Extrusion, JMD Systems oraz H-Systems, co sprawia, że jest istotnym elementem globalnej sieci przedsiębiorstw [18]. Orientując się ku nowoczesności i dynamicznemu rozwojowi, Grupa Aliplast wyróżnia się szeroką ofertą profili aluminiowych znajdujących zastosowanie w różnych branżach, od okien i fasad po meble, drzwi, systemy budowlane, a także przemysł samochodowy, telekomunikacyjny i elektroniczny. Centralnym organem

decyzyjnym jest zarząd, na którego czele stoi prezes Jan Kidaj. Jednak mimo dynamicznego rozwoju Grupa Aliplast napotyka wyzwania związane z efektywnością operacyjną, zwłaszcza w obszarach powiązanych z pakowaniem, magazynowaniem wyrobów gotowych oraz logistyką.

Łączna powierzchnia Grupy Aliplast obejmuje 39 tys. m² (rys. 1), na którą składają się: linia produkcyjna, lakiernia, anodownia, strefa pakowania, CNC, magazyny, SUR, hale produkcyjne dla czterech pras, narzędziownia oraz pomieszczenia biurowe.

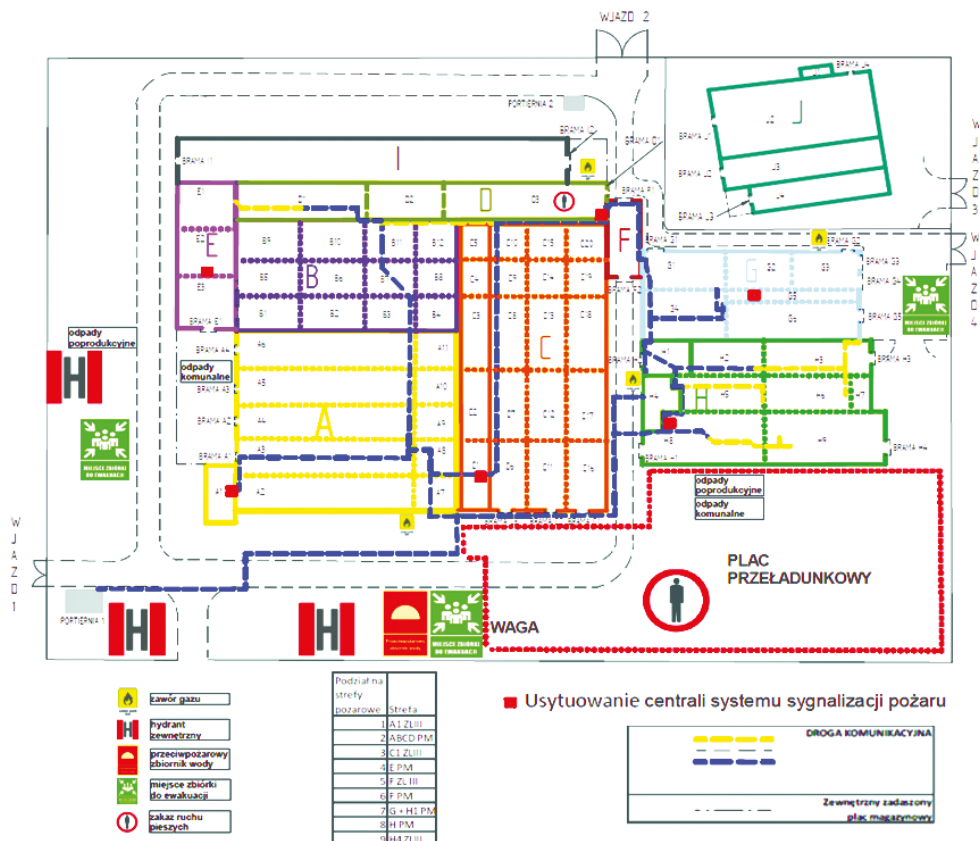


RYS. 1. Zdjęcie satelitarne Grupy Aliplast

ŹRÓDŁO: <https://www.google.com/maps>.

Kluczowym obszarem jest hala z czterema liniami produkcyjnymi wyposażonymi w różne prasy o imponujących parametrach. Proces produkcji obejmuje także wykorzystanie specjalnych kształtowników, dzięki czemu Grupa Aliplast postrzegana jest na światowym rynku jako jedno z najnowocześniejszych przedsiębiorstw wytwarzających wyroby z aluminium.

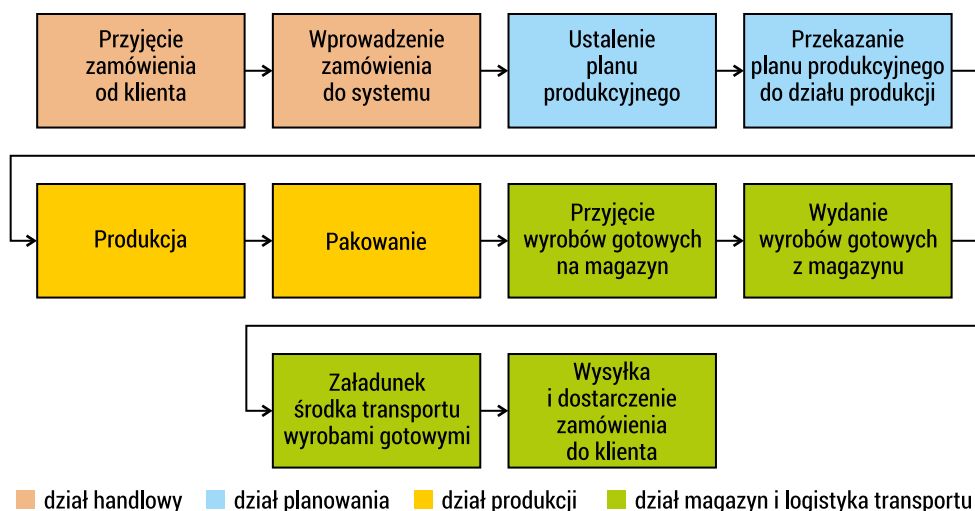
Firma, dbając o rozwój technologiczny, ma zaawansowany park maszynowy dostosowany do indywidualnych potrzeb. Struktura zakładowa obejmuje nie tylko obszary produkcyjne, lecz także biurowe, szatnie, owijarki i specjalnie przygotowaną strefę przyjęć. Wewnętrzne magazyny pełnią kluczową funkcję w organizacji zakładowej. Dodatkowo Grupa Aliplast dysponuje zewnętrznym placem przeładunkowym, na którym gromadzi surowce niezbędne do produkcji. Na rys. 2 zobrazowano rozmieszczenie poszczególnych obszarów w firmie, podkreślając kompleksowość i staranność w organizacji przestrzeni zakładowej.



RYS. 2. Nomenklatura Grupy Aliplast. **Hala A:** A1 – zarząd, sekretariat, kadry, księgowość, A2 – centrum szkoleniowe, magazyn akcesoriów, A3–6 – magazyn, A3 – lakiernia Decoral, A7 – lakiernia Promal, A8–11 – lakiernia pozioma Adal, biuro lakierni, **Hala B:** B1 – lakiernia pozioma AABO – zakładanie, zdejmowanie, B2–B3 – magazyn – zbieranie, B4 – CNC, B5 – owijarki, B6 – magazyn, B7 – lakiernia pionowa VL2, **Hala C:** C1 – biuro, szatnie, magazyn proszków, C2 – oczyszczalnia, C3 – lakiernia pionowa VL1, C4 – wykładanie i oklejanie, C5 – lakiernia pozioma VL2, C6 – Wieters 1, C7–C9 – prasa 3, C10 – pakowanie 3, C11 – korekcja, SUR, C12–C14 – prasa 2, C15 – pakowanie 2, C16 – Wieters 2, C17 – magazyn SUR, C17–C19 – prasa 1, C20 – pakowanie 1, **Hala D:** D1 – CNC, D2 – strefa przyjęć na systemy, D3 – pakowanie, magazyn Extrusion, **Hala E:** E1 – zagniatanie MULLER-Y, E2 – zagniatanie ISOMAT-Y, E3 – magazyn, **Hala F:** Magazyn, budynek socjalno-biurowy, **Hala G:** G1 – magazyn anodowni, G2 – obróbka mechaniczna, magazyn, G3 – oczyszczalnia, G4 – pakowanie, magazyn anodowni, G5 – pomieszczenie socjalno-biurowe, G6 – linia anodowania, **Hala H:** H1 – magazyn, budynek socjalno-biurowy, H2 – dział systemów osłonowych, pergole, H3 – magazyn tworzyw, H4 – pomieszczenia socjalno-biurowe, H5 – pakowanie 4, H6 – ekstruzja tworzyw sztucznych, H7 – pomieszczenie nadzoru, H8–H9 – prasa 4, **Hala I:** Magazyn, **Hala J:** Budynek produkcyjno-magazynowy i socjalno-biurowy, **Portiernia 1, Portiernia 2**

ŹRÓDŁO: materiały Grupy Aliplast.

Procesy logistyczne w firmie inicjowane są przez zamówienia klientów, które są następnie przekazywane do planowania produkcji. Uproszczony schemat tych procesów został przedstawiony na rys. 3.



RYŚ. 3. Uproszczony schemat procesów logistycznych Grupy Aliplast

ŹRÓDŁO: opracowanie własne.

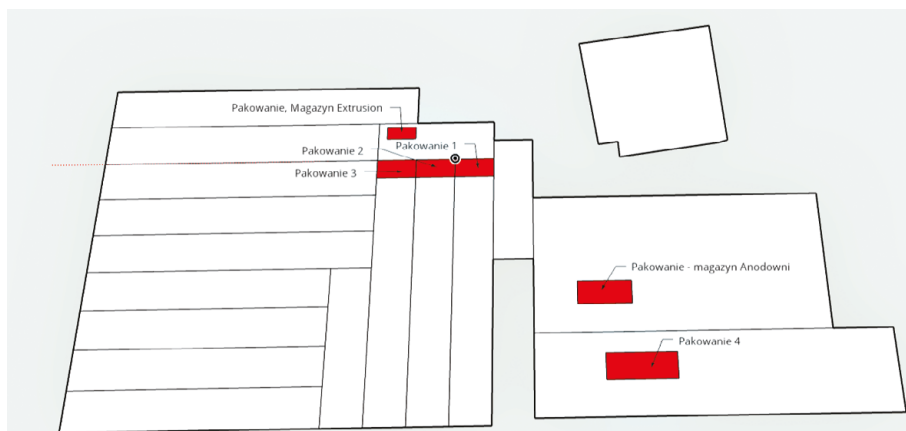
3. Metodyka i wyniki badań

3.1. Identyfikacja problemów

Celami badań były analiza procesów logistycznych w Grupie Aliplast, zidentyfikowanie występujących w nich problemów oraz zaproponowanie usprawnień umożliwiających eliminację trudności, niedogodności oraz zakłóceń. W trakcie intensywnej obserwacji i uczestnictwa w życiu codziennym przedsiębiorstwa, obejmującym rozmowy z pracownikami na różnych stanowiskach, praktyki w dziale pakowania oraz prace w zakresie praktyk studenckich, udało się zidentyfikować szereg problemów mających istotny wpływ na efektywność i sprawność operacyjną firmy. Analiza obejmowała okres od 1 lipca 2021 r. do 9 grudnia 2022 r.

W wyniku przeprowadzonych badań zidentyfikowano następujące problemy:

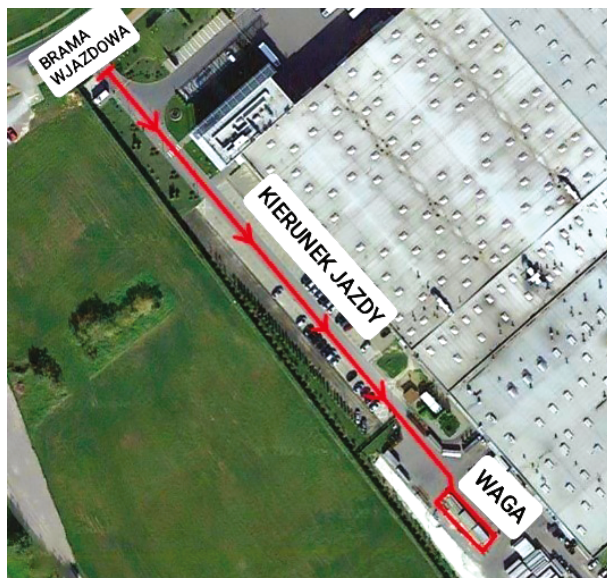
- niewystarczająca przestrzeń do pakowania wyrobów gotowych (nie jest ona dostosowana do liczby zatrudnionych pracowników, co generuje trudności w sprawnym przetwarzaniu gotowych produktów),
- złe rozmieszczenie miejsc do pakowania (powoduje nierównomierne obciążenie pracą, co utrudnia efektywne wykorzystanie siły roboczej – rys. 4),



RYS. 4. Rysunek poglądowy przedstawiający strefy pakowania

ŹRÓDŁO: opracowanie własne.

- niewystarczająca dostępność materiałów pomocniczych (brak efektywnego systemu zarządzania materiałami pomocniczymi oraz ich nieoptymalne rozmieszczenie wpływają negatywnie na proces pakowania),
- zbyt mała powierzchnia magazynowa (utrudnia to składowanie niezbędnych materiałów, co przekłada się na płynność procesów produkcyjnych),
- nieefektywne wykorzystanie miejsca w magazynie surowców (wpływa to na dostępność niezbędnych elementów w trakcie produkcji).



RYS. 5. Trasa przejazdu samochodów ciężarowych do magazynu surowców

ŹRÓDŁO: opracowanie własne.

Zidentyfikowane problemy mają bezpośredni wpływ na procesy produkcyjne, szczególnie na etapach pakowania i wysyłki gotowych wyrobów. Wydłużają one czasy produkcji, co w skrajnych przypadkach prowadzi do opóźnień w dostawach do klientów. Zatem aby usprawnić funkcjonowanie przedsiębiorstwa, konieczne jest skoncentrowanie się na eliminacji tych zakłóceń.

W miejscach przeznaczonych do pakowania często brakuje dostosowanych stanowisk, co zmusza pracowników do korzystania z niewłaściwych przestrzeni, to zaś prowadzi do utrudnień w wykonywaniu ich zadań. Istnieją również problemy z decentralizacją stanowisk do pakowania, co skutkuje nierównomiernym obciążeniem pracą i marnowaniem mocy przerobowych. Rozwiązanie tych problemów wymaga kompleksowego podejścia, uwzględniającego poprawę dostępu do przestrzeni pakowania, optymalizację rozmieszczenia stanowisk, efektywne zarządzanie materiałami pomocniczymi oraz maksymalizację strefy magazynowej. Działania w tych obszarach mogą się przyczynić do zwiększenia wydajności i skrócenia czasów produkcji, co w konsekwencji wpłynie pozytywnie na satysfakcję klientów i konkurencyjność przedsiębiorstwa. Kolejnym istotnym wyzwaniem identyfikowanym przez pracowników Grupy Aliplast jest brak odpowiedniej przestrzeni do magazynowania wyrobów gotowych. Obecnie spakowane produkty przechowywane są głównie w strefach D2 (przyjęć na systemy) oraz D3 (pakowanie, magazyn Extrusion), co generuje szereg problemów operacyjnych.

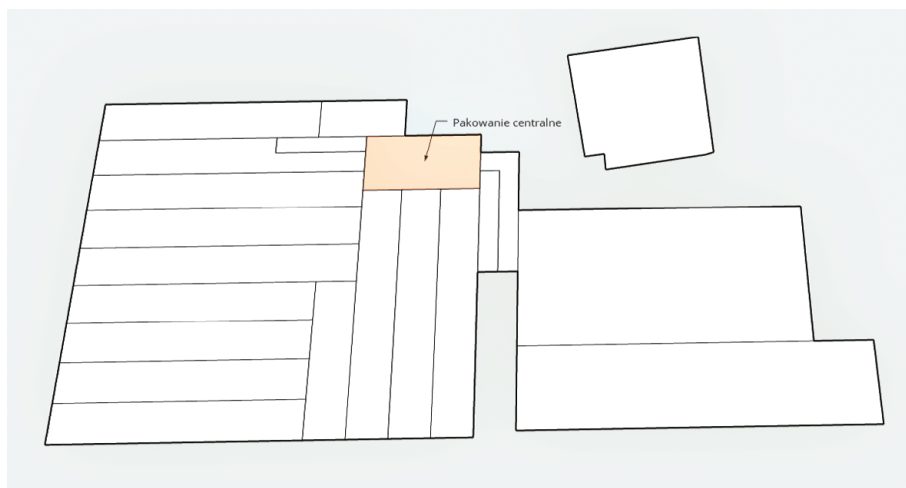
Również niedostateczna przestrzeń magazynowa staje się krytycznym problemem ze względu na ograniczoną możliwość składowania wyrobów gotowych. Produkty te zajmują miejsce w strefach nieprzeznaczonych do magazynowania, utrudniając pracownikom poruszanie się oraz przemieszczanie wózków widłowych. Odpowiednie przechowywanie produktów stanowi kluczowy element bezpieczeństwa i efektywności operacyjnej. Miejsca składowania zajęte przez niesprzedane produkty stanowią dodatkowy problem.

Aby zminimalizować wpływ tych problemów na efektywność przedsiębiorstwa, konieczne jest podjęcie odpowiednich działań naprawczych. Warto rozważyć alternatywne lokalizacje magazynów wyrobów gotowych, które pozwolą na zwiększenie dostępności i sprawniejsze zarządzanie przestrzenią. Optymalizacja przemieszczania się wózków widłowych oraz pracowników wymaga przemyślanej reorganizacji strefy pakowania. Ponadto w przedsiębiorstwie znajduje się zewnętrzny magazyn surowców, gdzie przechowuje się złom pozyskany w procesie produkcji oraz wałki aluminiowe. Jest on jednak również wykorzystywany nieefektywnie, szczególnie w kontekście konieczności pozostawienia miejsca dla manewrów ciężarówką i wyjazdu tą samą drogą, którą pojazd wjechał. Rozwiązanie tych kwestii będzie kluczowe dla poprawy przepływu materiałów i gotowych wyrobów w ramach przedsiębiorstwa, co przyczyni się do zwiększenia efektywności operacyjnej i redukcji ewentualnych opóźnień w dostawach.

Każdy z wyżej wymienionych problemów istotnie wpływa na funkcjonowanie przedsiębiorstwa, utrudniając płynność procesów operacyjnych. Aby je wyeliminować, w dalszych podrozdziałach przedstawiono propozycje usprawnień, które mają na celu zwiększyć efektywność i optymalizację przestrzeni magazynowej.

3.2. Centralizacja strefy pakowania

Jako rozwiązanie dla dwóch kluczowych wyzwań stojących przed firmą – ograniczonej przestrzeni do przygotowywania gotowych produktów do wysyłki oraz nieefektywnego rozmieszczenia miejsc do tego przeznaczonych – zaproponowano skoncentrowanie działu pakowania w jednym miejscu w obrębie Grupy Aliplast. Plan zakłada konsolidację wszystkich istniejących obecnie punktów pakowania w jednym, specjalnie przeznaczonym do tego obszarze, oznaczonym na rys. 6 jako pakowanie centralne. Nowo utworzona strefa będzie obejmować tereny, które obecnie zajmują obszary pakowanie 1, pakowanie 2, pakowanie 3 oraz pakowanie magazyn Extrusion.



RYS. 6. Propozycja umiejscowienia pakowania centralnego

ŹRÓDŁO: opracowanie własne.

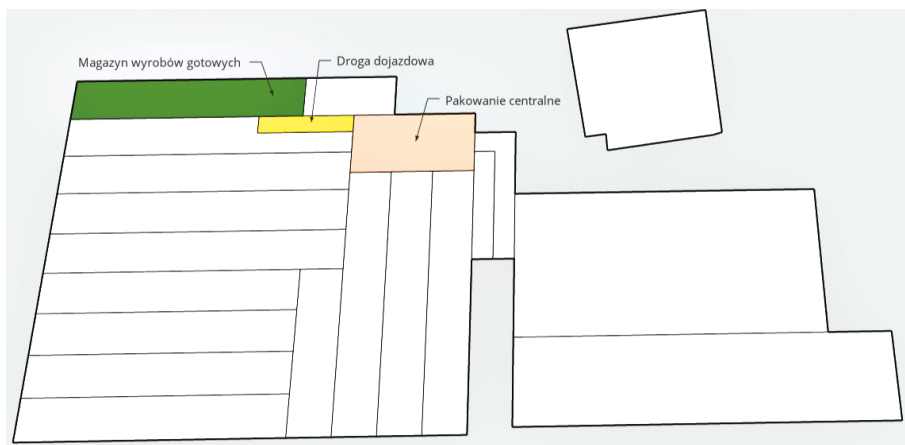
W nowej strefie pakowania przedsiębiorstwa planuje się umieszczenie dziewięciu stanowisk z automatycznymi podnośnikami hydraulicznymi ułatwiającymi pakowanie. Zostanie do niej przeniesionych pięć używanych obecnie podnośników, a dodatkowo zostaną zainstalowane cztery nowe, w tym jeden dłuższy do pakowania dłuższych profili.

Centralna strefa pakowania będzie też obejmować miejsce na składowanie koszy z gotowymi wyrobami oraz paczek gotowych do transportu. Planowane jest stworzenie jednej strefy do zabezpieczania zbitek drewnianych, co zredukuje koszty. Strefa będzie obsługiwana przez trzy suwnice i wózki widłowe transportujące wyroby i kosze technologiczne.

Nowe rozmieszczenie stanowisk zmniejszy zajmowaną powierzchnię z 7 tys. m² do 4,2 tys. m², co umożliwi wprowadzenie nowych inwestycji. Całkowity koszt tego usprawnienia wynosi 40 tys. zł netto, dzięki temu zaś możliwe będzie lepsze zarządzanie procesem pakowania i wykorzystanie przestrzeni, a jednocześnie zwiększy się bezpieczeństwo na terenie przedsiębiorstwa.

3.3. Utworzenie magazynu wyrobów gotowych

Kolejnym krokiem w celu eliminacji problemu braku miejsca na składowanie wyrobów gotowych może być utworzenie magazynu w nowo wybudowanej hali, oznaczonej jako hala I (rys. 7). Ten strategiczny krok ma nie tylko polepszyć wykorzystanie dostępnej przestrzeni, lecz także usprawnić proces zarządzania gotowymi produktami, co przyczyni się do zwiększenia efektywności operacyjnej przedsiębiorstwa.

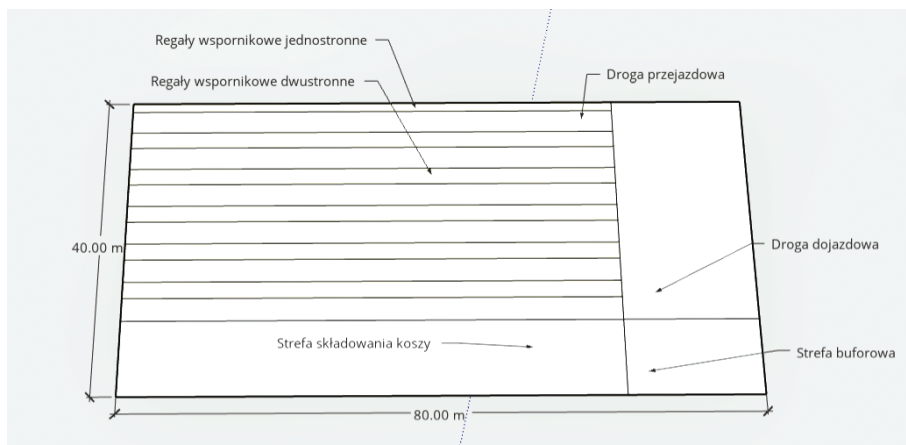


RYS. 7. Propozycja umiejscowienia magazynu wyrobów gotowych i drogi przejazdowej

ŹRÓDŁO: opracowanie własne.

Wprowadzenie dedykowanego magazynu wyrobów gotowych jest odpowiedzią na rosnące potrzeby logistyczne firmy. Magazyn ten zostanie wyposażony w regały wspornikowe, które są idealnym rozwiązaniem na przechowywanie materiałów o zróżnicowanych wymiarach i ciężarach. Dzięki nim firma Aliplast będzie mogła skuteczniej zarządzać asortymentem produktów, w tym profilami o długościach od 1 do 14 m. Regały te pozwolą na lepsze wykorzystanie wysokości hali, co jest kluczowe w kontekście składowania i efektywnego zarządzania przestrzenią magazynową. Zgodnie z planem konieczne jest utworzenie wolnej przestrzeni o wymiarach 10×80 m w obszarze magazynowym. Wynika to z potrzeby zapewnienia miejsca na przechowywanie koszy, które nie nadają się do umieszczania na regałach wspornikowych. Szczegółowe rozmieszczenie elementów systemu magazynowania zostało zaprezentowane na rys. 8.

Całkowity koszt wprowadzenia tych usprawnień magazynowych wynosi około 4,98 mln zł. W tę sumę wliczają się koszty zakupu regałów wspornikowych, farby do oznaczenia dróg dojazdowych oraz specjalnego czterokierunkowego wózka widłowego Still do składowania wysokiego FM-4W [20]. Jego wybór był wynikiem szczegółowej analizy potrzeb i wymagań magazynu. Wózek ten został specjalnie zaprojektowany do efektywnego transportu wyrobów gotowych w magazynie, a jego wykorzystanie ma się przyczynić do zwiększenia szybkości załadunku i rozładunku towarów.

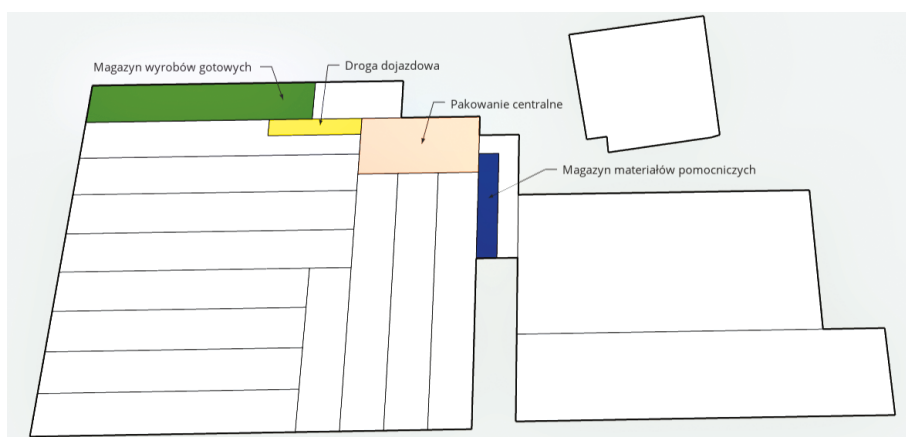


RYS. 8. Rozmieszczenie infrastruktury magazynu wyrobów gotowych

ŹRÓDŁO: opracowanie własne.

3.4. Utworzenie magazynu materiałów pomocniczych

Aktualnie w Grupie Aliplast różnorodne materiały pomocnicze – przekładki, kartony, folia i inne – są rozproszone na terenie firmy, co powoduje trudności w dostępie i zajmuje dużo miejsca. Proponowanym rozwiązaniem jest utworzenie centralnego magazynu materiałów pomocniczych, najlepiej w pobliżu głównej strefy pakowania. Dostępna jest hala F, która graniczy ze strefą pakowania i może zostać zaadaptowana na magazyn (rys. 9).



RYS. 9. Propozycja umiejscowienia magazynu materiałów pomocniczych

ŹRÓDŁO: opracowanie własne.

Obecnie większość materiałów jest przechowywana na paletach, co zajmuje dużo miejsca. W nowym magazynie planuje się użycie regałów paletowych, które pozwolą na efektywniejsze wykorzystanie przestrzeni. Przeprowadzono analizę trzech typów regałów od różnych producentów, z której wynika, że najlepszym wyborem są regały firmy Mecalux [19], mające odpowiednie wymiary, nośność i korzystną cenę. Dodatkowo do przechowywania drobnych materiałów, jak taśmy klejące czy folie, zakupione zostaną specjalne szafy metalowe, podobne do tych, które już są w użyciu w firmie.

Koszt całkowity wprowadzenia tych zmian to około 94 tys. zł, co obejmuje zakup regałów, szaf oraz niezbędnych materiałów, jak farba do oznaczeń. Oczekuje się, że dzięki temu zwiększy się efektywność pracy, a pracownicy pakujący zaoszczędzą około 30 minut na zmianę, co przy 130 pracownikach przekłada się na znaczną oszczędność czasu i pieniędzy. Dodatkowo nowy system magazynowania wprowadzi większy porządek i systematykę w przechowywaniu materiałów.

3.5. Przebudowa magazynu surowców

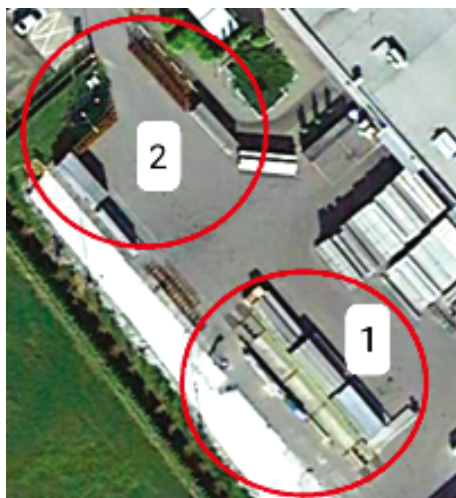
Obecny stan magazynu surowców, o powierzchni 6 tys. m², jest suboptymalny, wykorzystywany jedynie w 55% swoich możliwości. Ta sytuacja stanowi znaczący problem dla przedsiębiorstwa, zwłaszcza pod kątem efektywności finansowej i operacyjnej. W celu zwiększenia rentowności i skuteczności tego obszaru zaproponowano przebudowę magazynu surowców, której kluczowymi elementami są instalacja dodatkowej bramy oraz utworzenie nowej drogi przejazdowej. Ta zmiana ma usprawnić ruch ciężarówek w obrębie magazynu, eliminując konieczność wykonywania skomplikowanych i czasochłonnych manewrów nawrotowych. Dodatkowo przylegająca do magazynu działka (rys. 10) z dostępem do ul. Stefana Banacha w Lublinie zostanie włączona w plan rozbudowy. Połączenie magazynu surowców z ulicą poprzez wybudowanie drogi dojazdowej i bramy wymusi zastosowanie ruchu jednokierunkowego samochodów ciężarowych w tej części przedsiębiorstwa.



RYS. 10. Działka granicząca z magazynem surowców Grupy Aliplast

ŹRÓDŁO: opracowanie własne.

Istotnym elementem proponowanych zmian jest reorganizacja systemu ważenia pojazdów. Przeniesienie wagi dla ciężarówek z miejsca oznaczonego na rys. 11 cyfrą 1 i ustawienie jej w miejscu oznaczonym cyfrą 2 (za wjazdem na magazyn surowców) nie tylko przyspieszy procesy logistyczne, lecz także usprawni procedury załadunku i rozładunku. Proces operacyjny zostanie znacząco uproszczony: wjeżdżające na teren przedsiębiorstwa samochody ciężarowe będą od razu poddawane ważeniu, a następnie kierowane do strefy załadunku/rozładunku.



RYS. 11. Propozycja zmiany ustawienia wagi samochodów ciężarowych

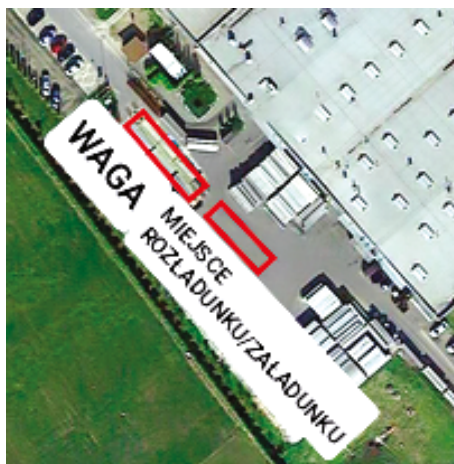
ŹRÓDŁO: opracowanie własne.

Proces przeładunku z wykorzystaniem nowego układu będzie przebiegał następująco:

- kierowca wjeżdża na teren magazynu surowców i automatycznie znajduje się na wadze. Po zważeniu pojazdu kierowca musi zjechać na specjalnie oznaczone pole (rys. 12) w celu rozładunku lub załadunku;
- po zjechaniu na oznaczone pole magazynierzy przystępują do rozładunku bądź załadunku surowców. Następnie kierowca musi wycofać naczepę i ciągnik siodłowy na wagę w celu ponownego ważenia;
- powtórne ważenie;
- po ponownym zważeniu kierowca może przejechać przez pozostałą część magazynu surowców do specjalnie oznaczonego miejsca postojowego, gdzie oczekuje na dokumentację i dokonuje prac zabezpieczających naczepę;
- wyjazd z terenu firmy przez bramę przy ul. Stefana Banacha.

Droga dojazdowa, którą planuje się wybudować, będzie miała 90 m długości i 4 m szerokości, co jest odpowiednie dla ruchu ciężarowego. Całkowity koszt montażu bramy, budowy drogi oraz przeniesienia wagi to 270 tys. zł netto. Te inwestycje

mają nie tylko poprawić efektywność pracy, lecz także zwiększyć bezpieczeństwo oraz komfort pracowników i kierowców.



RYS. 12. Propozycja umieszczenia miejsca załadunku/rozładunku

ŹRÓDŁO: opracowanie własne.

Zastosowanie proponowanego procesu przyniesie liczne korzyści. Po pierwsze, minimalizuje liczbę wykonywanych przez kierowców manewrów w magazynie, co przekłada się na efektywność operacyjną. Po drugie, maksymalizuje dostępną przestrzeń na magazynowanie surowców, a także usprawnia pracę pracowników magazynu surowców.

Nowa powierzchnia wprowadzonego usprawnienia będzie zajmować około 1,2 tys. m², co stanowi jedynie 20% całkowitej powierzchni magazynu surowców. Pozwoli to na zwiększenie wykorzystania magazynu na składowanie surowców do imponującego poziomu 80%. Ponadto uporządkowanie procesów logistycznych przyniesie znaczne korzyści w zakresie czasu pracy i ogólnej produktywności. Zastosowanie tego rozwiązania przyczyni się zarówno do optymalizacji przestrzeni magazynowej, jak i umożliwi efektywniejszy przepływ surowców, co ma kluczowe znaczenie dla procesów logistycznych w przedsiębiorstwie.

4. Podsumowanie

Jako ważny gracz na rynku profili aluminiowych Grupa Aliplast skupia się na nowoczesności i dynamicznym rozwoju, oferując szeroką gamę produktów dla rozmaitych branż. Jej struktura obejmuje zróżnicowane obszary produkcyjne, od hali produkcyjnej po działy lakierni, anodowni, magazynów i logistyki transportu. Innowacyjność przedsiębiorstwa widoczna jest nie tylko w procesie produkcji, lecz także w dbałości

o jakość i trwałość produktów sprawdzanych we własnym laboratorium. Jednakże intensywna analiza operacyjna ujawniła istniejące wyzwania, zwłaszcza w obszarze pakowania, magazynowania i logistyki. Niewystarczająca przestrzeń, zbyt małe magazyny czy problemy z dostępnością surowców wpływają bezpośrednio na efektywność i płynność procesów operacyjnych.

W celu rozwiązania tych problemów zaproponowano kompleksowe usprawnienia, takie jak centralizacja strefy pakowania, utworzenie dedykowanego magazynu wyrobów gotowych oraz efektywne zarządzanie materiałami pomocniczymi. Dodatkowo nowy układ magazynu surowców ma zmaksymalizować dostępną przestrzeń i efektywne zarządzanie procesem przepływu surowców.

Wdrożenie tych rozwiązań przyczyni się zarówno do eliminacji bieżących problemów operacyjnych, jak i zwiększy efektywność przedsiębiorstwa, poprawiając jego konkurencyjność na globalnym rynku. Grupa Aliplast, kierując się innowacyjnym podejściem, może kontynuować swój rozwój i spełniać najwyższe standardy jakościowe i technologiczne.

Literatura

- [1] Arhipov A., Lyashenko S., *Logistics concept: content, trends, efficiency*, „Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Marine engineering and technologies” 2022, nr 1, s. 98–104.
- [2] Astafieva N.V., Ivanova N.A., Dorozhkina E.G., Agafonov I.A., *Logistics systems in modern conditions of the network infrastructure of the country's transport complex*, „IOP Conference Series: Materials Science and Engineering” 2020, nr 918 (1), 012040.
- [3] Baporikar N., *Logistics Effectiveness Through Systems Thinking*, „International Journal of System Dynamics Applications (IJSDA)” 2020, nr 9 (2), s. 64–79.
- [4] Blaik P., *Logistyka. Koncepcja zintegrowanego zarządzania*, PWE, Warszawa 2001.
- [5] Gołemska E., *Kompendium wiedzy o logistyce*, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 2010.
- [6] Gritsenko S.I., Karpun O.V., Kolisnichenko A., *Digitalization of logistics company business process in conditions of industry 4.0*, „Intellectualization of Logistics and Supply Chain Management” 2022, nr. 11, s. 46–56.
- [7] Gomes A.C., de Lima Junior F.B., Soliani R.D., Oliveira P.R. de S., de Oliveira D.A., Siqueira R.M., Nora L.A.R. da S., de Macêdo J.J.S., *Logistics management in e-commerce: challenges and opportunities*, „Revista de Gestão e Secretariado” 2023, nr 14 (5), s. 7252–7272.
- [8] Kannadhasan S., Nagarajan R., Srividhya G., Wang X., *Recent Trends in Logistics Management [w:] Utilizing Blockchain Technologies in Manufacturing and Logistics Management*, red. S.B. Goyal, N. Pradeep, P.K. Shukla, M.M. Ghonge, R.V. Ravi, Information Resources Management Association, 2022.
- [9] Krichen S., *Supply chain management and optimization in transportation logistics*, „Advances In Computing And Engineering” 2022, nr 2 (2), s. 70–72.
- [10] Kubański M., *Systemy logistyczne*, Akademia Techniczno-Humanistyczna w Bielsku Białej, Bielsko-Biała 2015.

- [11] Lagorio A., Zenezini G., Mangano G., Pinto R., *A systematic literature review of innovative technologies adopted in logistics management*, „International Journal of Logistics Research and Applications” 2022, nr 25 (7), s. 1043–1066.
- [12] Lin X., Mamun A.A., Yang Q., Masukujjaman M., *Examining the effect of logistics service quality on customer satisfaction and re-use intention*, „PLOS ONE” 2023, nr 18 (5), e0286382.
- [13] Mytrofanova N., *Improvement of the information logistics system at the enterprise (on the example of private enterprise “baltika”, khmelnytskyi, ukraine)*, „Sj-economics scientific journal” 2023, nr 49 (2), s. 46–58.
- [14] Pfohl H.C., *Systemy logistyczne. Podstawy organizacji i zarządzania*, Biblioteka Logistyka, Poznań 1998.
- [15] Pisz I., Sęk T., Zielecki W., *Logistyka w przedsiębiorstwie*, PWE, Warszawa 2013.
- [16] Ubaydullo G., Narimonjon I., *Utilizing logistics Information Management System in logistic companies*, „Journal of Financial Technology and Innovation” 2023, nr 2 (1), s. 19–25.
- [17] Wong W.P., Sinnandavar C.M., Soh K.L., *The relationship between supply environment, supply chain integration and operational performance: The role of business process in curbing opportunistic behaviour*, „International Journal of Production Economics” 2021, nr 232, 107966.
- [18] <https://www.aliplast.pl/> [dostęp: 10.10.2023].
- [19] <https://www.logismarket.pl/regal-paletowy> [dostęp: 10.10.2023].
- [20] <https://www.still.pl/produkty/nowe-wozki-widlowe/wozki-wysokiego-skladowania/fm-4w.html> [dostęp: 10.10.2023].

Analiza naprężenia oraz ciśnienia podczas przemieszczania się leja względem kikuta

*Julia Jagodyńska, Anita Gryko, Dominika Nowińska,
Kacper Snarski, Piotr Prochor, Marcin Dziemianowicz*

*Politechnika Białostocka, Koło Naukowe ORTHOS
julia.jagodynska.107166@student.pb.edu.pl*

Summary: The prosthetic socket is an integral part of the limb prosthesis and ensures the load transfer to the residual limb [1–4]. However, in order to enable proper connection between these structures, it is necessary to adjust the appropriate geometric parameters of the prosthetic socket. As part of the study, it was decided to numerically analyze the impact of selected construction and material parameters on the value of stresses and pressures in the socket-limb connection. The obtained results make it possible to improve the selection of the prosthetic socket to the user, clearly increasing the quality of user's everyday life.

Key words: prosthetic sockets, residual limb, numerical analysis, orthopaedic

1. Wstęp

Leje protezowe są głównym komponentem protez. Stanowią one swoiste połączenie pomiędzy protezą a kikutem osoby po amputacji, które przekłada się na efektywność, stabilność i komfort użytkowania protezy [1]. Współczesne leje protezowe są projektowane z uwzględnieniem najnowszych osiągnięć w zakresie medycyny, inżynierii materiałowej oraz technologii produkcji. Specjaliści w dziedzinie protetyki starają się uzyskać dokładne odwzorowanie kształtu kikuta, co umożliwia spersonalizowane podejście do każdego pacjenta. Poprawne dopasowanie leja protezowego jest kluczowe dla zapewnienia komfortu podczas noszenia protezy. Odpowiednio skonstruowany lej przekłada się na równomierne rozłożenie ciśnienia, co minimalizuje ryzyko obtarć, bolesnych punktów nacisku czy owrzodzeń. Leje, pomimo że są spersonalizowane, często uważane są za najbardziej problematyczny element protezy [2]. Jest to spowodowane wahaniami objętości kikuta, które mogą powstawać ze względu na dietę, poziom aktywności czy choroby współistniejące, np. cukrzycę [2, 3].

Budowa i długość kikuta pełnią kluczową funkcję w doborze leja protezowego. Ma to związek z występującymi wewnątrz niego obciążeniami. Analogicznie im dłuższa jest pozostałość kończyny, tym większy jej fragment możemy wprowadzić do leja protezowego, a co za tym idzie poprawie ulegają komfort pacjenta, estetyka oraz sposób lokomocji. W sytuacji, gdy kikut amputanta ma co najmniej 30 cm długości, pacjent ma możliwość pełnej kontroli nad protezą. Znane są przypadki, w których kikut ma długość krótszą niż 30 cm – występują wówczas problemy z zaburzeniami równowagi mięśniowej, co spowodowane jest utratą masy mięśniowej w okolicy bioder. Sam stan mięśni wpływa na anatomię kikuta, ponieważ podczas amputacji tracą one swoje naturalne przyczepy. Z tego powodu ważne są odpowiednie uformowanie kikuta oraz zapewnienie nowych przyczepów mięśniowych w jego obrębie. Oddziałuje to pozytywnie na osadzenie kikuta w leju oraz zwiększa mobilność kikuta, co znacznie poprawia możliwość kontroli nad protezą. Sam kikut powinien być uformowany w kształt walca lub stożka delikatnie zwężającego się w kierunku dystalnym [4, 5]. Wszystkie powyższe cechy wpływają na odpowiedni dobór leja protezowego. Nieodpowiednio dopasowany lej naraża użytkownika na uszkodzenia zewnętrznych struktur kikuta (np. obtarcia na skórze, występujące u 36–63% użytkowników protez kończyn dolnych). Ważne jest, aby pacjent nie odczuwał bólu podczas noszenia protezy [6, 7].

Technologia druku 3D odgrywa coraz większą rolę w dziedzinie protetyki, umożliwiając precyzyjne, spersonalizowane i innowacyjne podejście do projektowania oraz wytwarzania lejów protezowych [8]. W porównaniu z tradycyjnymi metodami produkcji, które często wymagają wielu etapów przygotowań, druk 3D pozwala na skrócenie czasu oczekiwania na gotową protezę, co ma istotne znaczenie dla pacjentów. Zaletami druku 3D w aspekcie produkcji lejów protezowych są: dopasowanie leja do indywidualnych potrzeb pacjenta, zdolność do tworzenia skomplikowanych kształtów i struktur, a także możliwość zastosowania różnych materiałów, które zapewnią lekkość oraz wytrzymałość leja. Zwiększa to zarówno komfort użytkowania, jak i zmniejsza obciążenie dla użytkownika, szczególnie istotne w protezach kończyn dolnych. Elastyczność procesu druku 3D staje się kluczowa w przypadku konieczności wprowadzenia modyfikacji, dostosowań lub ulepszeń protezy. Dzięki temu proces modyfikacyjny jest bardziej efektywny, a pacjenci mogą szybko korzystać z ulepszonych bądź dostosowanych do zmieniających się potrzeb protez [9, 10].

W niniejszej pracy skupiono się na ocenie struktury leja protezowego za pomocą analizy numerycznej. Podobne badania wykonali Sofia C. Henao wraz ze współpracownikami. Zbadali oni naprężenia powstające w leju podczas trzech przypadków: zakładania protezy, stania oraz chodu. Sprawdzili różnicę naprężenia między przypadkami statycznym a dynamicznym i wykazali, że obszar występowania wysokich naprężeń zwiększył się o $23\% \pm 19\%$ dla przypadku dynamicznego. Uznali, że komfort użytkowania leja można ocenić na podstawie pokrycia się obszarów maksymalnych naprężeń z obszarami o ich niższej wartości [11]. Częstym aspektem badań są ciśnienia powstające na granicy lej–kikut, co przedstawiono w kilku pracach [12, 13]. Jednakże w literaturze brakuje badań, które analizowałyby naprężenia i ciśnienia podczas przemieszczania się leja względem kikuta, czego podjęto się w niniejszym tekście.

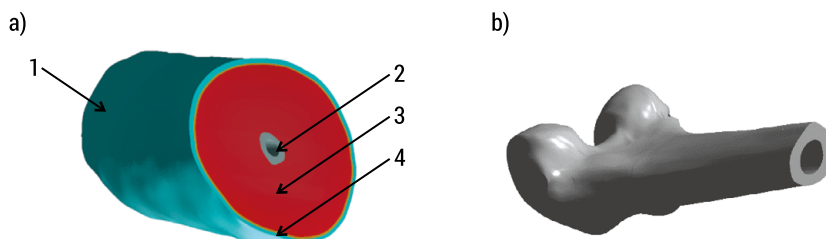
2. Metodyka badań

Do poprawnej interpretacji wyników konieczne jest przedstawienie metodyki badawczej, przede wszystkim, jak powstały modele CAD oraz modele numeryczne, a także, w jaki sposób dokonano badań. Przedmiotem analiz numerycznych był lej protetyczny, który opracowano z wykorzystaniem skanu pozytywu gipsowego podudzia pacjenta (mężczyzna, 66 lat, 90 kg, 1,76 m). Skan uzyskano dzięki współpracy z firmą Design Pro Technology (Białystok, Polska).

3. Modele CAD

Za dystalną część udową (kikut) posłużył model uzyskany od mężczyzny w wieku 44 lat o masie 85 kg oraz wzroście 1,85 m. Wstępną obróbkę modelu geometrycznego kikuta zapisanego w formacie STL przeprowadzono przy użyciu oprogramowania Meshlab (ISTI-CNR, Piza, Rzym, Włochy). Zredukowano w nim o 80% liczbę trójkątów tworzących model.

Kolejnym krokiem było opracowanie elementów składowych kikuta i leja protezowego. Wykorzystano do tego oprogramowanie SolidWorks 2022 (Dessault Systemes S.A., Vélizy-Villacoublay, Francja). Dzięki opcji skalowania oraz operacjom boolowskim utworzono skórę (grubość 2 mm) i tkankę mięśniową [14]. Po utworzeniu tkanek miękkich do geometrii dodano przygotowaną geometrię kości, która uwzględnia dalszą nasadę oraz fragment trzonu (rys. 1b). Odległość od kłykci nasady dalszej do końca kikuta wynosi 15 mm. W tym miejscu również posłużono się operacjami boolowskimi. Na koniec na podstawie skanu stworzono lej protezowy. Opracowany model CAD połączenia lej-kikut przedstawiono na rys. 1a.



RYS. 1. a) model CAD połączenia lej-kikut: 1 – lej, 2 – kość, 3 – mięśnie, 4 – skóra, b) dystalna część kości udowej użyta w modelu

ŹRÓDŁO: opracowanie własne.

4. Modele numeryczne

Przy użyciu oprogramowania Ansys Workbench 2022 R1 (Ansys, Inc., Canonsburg, Pennsylvania, USA) przeprowadzono analizy numeryczne w celu zbadania połączenia lej–kikut w różnych wariantach. Materiałami tworzącymi lej były trzy tworzywa sztuczne: polietylen (PE), polipropylen (PP) oraz polilaktyd (PLA) [15]. Przyjęto, że dystalna część kości udowej zbudowana jest tylko z kości korowej [16]. Celem uproszczenia analiz wymienione materiały przyjęto jako homogeniczne oraz izotropowe. W przypadku skóry i mięśni właściwości określono zgodnie z modelem neo-Hookeana, który zakłada hiperelastyczność materiałów [17, 18]. Właściwości użytych w analizach materiałów przedstawiono w tabeli 1.

TABELA 1. Właściwości materiałów użytych w badaniach

Materiały homogeniczne, izotropowe				
Materiał	kość korowa	PE	PP	PLA
Moduł Younga [GPa]	17,00	1,10	1,60	2,00
Wsp. Poissona	0,30	0,42	0,42	0,35
Gęstość [g/cm ³]	1,85	0,95	0,91	1,30
Materiały hiperelastyczne wg modelu neo-Hookeana				
Materiał	skóra	mięśnie		
Początkowy moduł ściskania μ [MPa]	0,20	0,04		
Parametr ściśliwości [1/MPa]	0,14	18,00		
Gęstość [g/cm ³]	1,17	1,09		

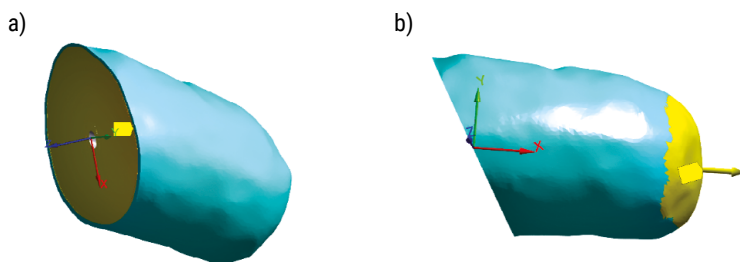
ŹRÓDŁA: R. Będziński, *Biomechanika inżynierska*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 1997; www.ineos.com/ [dostęp: 27.12.2023]; T.T. Dao, M.C.H.B. Tho, *A systematic review of continuum modeling of skeletal muscles: current trends, limitations, and recommendations*, „Applied Bionics and Biomechanics” 2018; F. Frauziols, P. Badel, L. Navarro, J. Molimard, N. Curt, S. Avril, *Subject-specific computational prediction of the effects of elastic compression in the calf* [w:] *Biomechanics of Living Organs*, red. Y. Payan, J. Ohayon, Academic Press, London 2017, s. 523–544.

Do utworzenia siatki elementów skończonych wykorzystano 10-węzłowe czworokienne elementy typu SOLID187 o rozmiarze 15 mm, po wcześniejszym procesie optymalizacji. Uzyskana liczba elementów wynosiła 451 239 dla całego modelu.

Parą trącą był obszar skóry od strony zewnętrznej i leja od strony wewnętrznej. Założono kontakt tarcowy o normlanym współczynniku sztywności 0,01 oraz współczynniku tarcia 0,34 [19]. Określono również zachowanie zakłóceń (ang. *intereference treatment*) między elementami trącymi przy użyciu opcji *add offset, ramped effects*.

Zamodelowano wcisk na poziomie 0,50 mm, a w kontakcie określono przesunięcie (ang. *offset*) na powyższą wartość. Ponadto zdefiniowano funkcję *pinball region* o promieniu 1 mm.

Obliczenia podzielono na dwa etapy. W pierwszym sprawdzono, jak układ zachowuje się bez przemieszczenia leja względem kikuta. Natomiast w drugim – jak zachowują się elementy modelu przy przemieszczeniu leja względem kikuta o 75 mm (symulacja zdjęcia leja z kikuta). Zbadano takie parametry, jak naprężenia zredukowane Hubera–Misesa–Hencky’ego (HMH) występujące na elementach modelu, ciśnienie pojawiające się na kikucie oraz siłę reakcji. Przyjęte warunki brzegowe obejmowały podparcie uzyskane przez zablokowanie stopni swobody w węzłach elementów przylegających do ściany kikuta na kierunku prostopadłym do niej (w przyjętym układzie dla osi Z, zgodnie z rys. 2a). Natomiast przemieszczenie leja względem kikuta określono zgodnie z osią długą uda, tj. równoległe zorientowane z osią X dla przyjętego układu współrzędnych (rys. 2b). Obciążenie w przypadku bez przemieszczenia wynika z geometrycznego wcisku leja na kikut, natomiast w warunkach z przemieszczeniem z wcześniej wspomnianego wcisku oraz ruchu leja względem kikuta.



RYS. 2. Warunki brzegowe badań numerycznych: a) układ współrzędnych dla podpory ruchomej, b) przemieszczenie leja względem kikuta

ŹRÓDŁO: opracowanie własne.

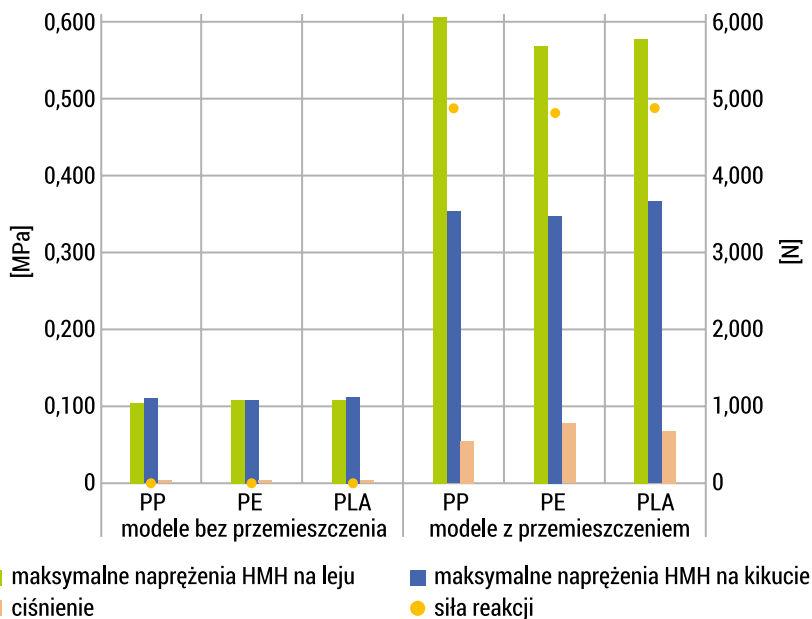
5. Wyniki

W tabeli 2 przedstawiono otrzymane maksymalne wartości naprężenia HMH, ciśnienia oraz siły reakcji (siły tarcia wynikające z ruchu jednej geometrii względem drugiej – leja względem kikuta) powstające na leju i kikucie dla wszystkich wariantów obliczeń: bez przemieszczenia i z przemieszczeniem oraz trzech materiałów. Natomiast na rys. 3 wartości te zostały zobrazowane w formie wykresu w celu lepszego uwidocznienia różnic w wynikach.

TABELA 2. Uzyskane parametry naprężenia, ciśnienia i siły reakcji ze wszystkich wariantów obliczeń

	Maksymalne naprężenia HMH na leju [MPa]	Maksymalne naprężenia HMH na kikucie [MPa]	Ciśnienie [MPa]	Siła reakcji [N]
	bez przemieszczenia			
Polipropylen (PP)	0,105	0,110	0,004	0,002
Polietylen (PE)	0,108	0,108	0,004	0,001
Polilaktyd (PLA)	0,109	0,112	0,004	0,003
	z przemieszczeniem			
Polipropylen (PP)	0,608	0,354	0,055	4,802
Polietylen (PE)	0,569	0,348	0,078	4,742
Polilaktyd (PLA)	0,578	0,367	0,068	4,801

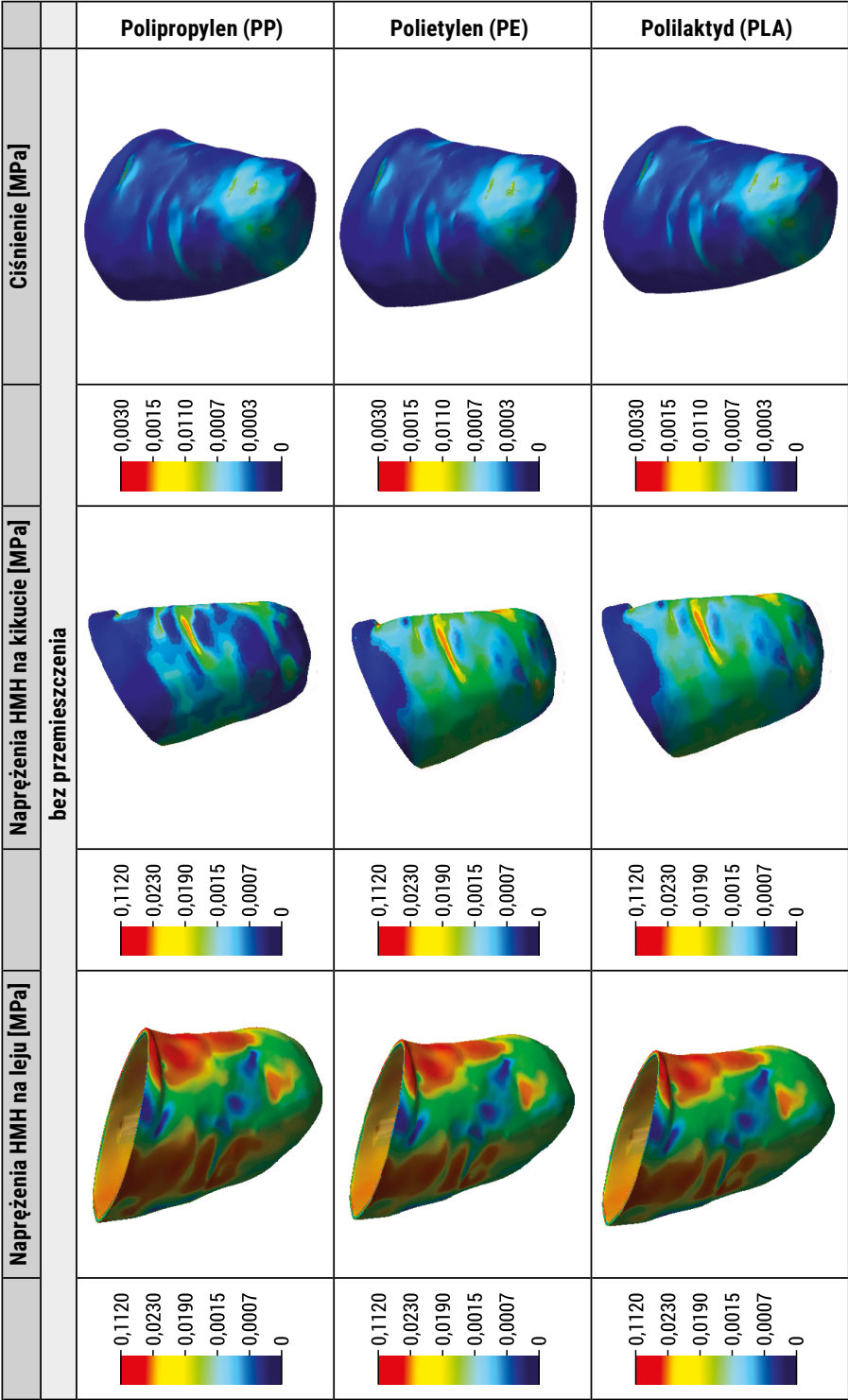
ŹRÓDŁO: opracowanie własne.



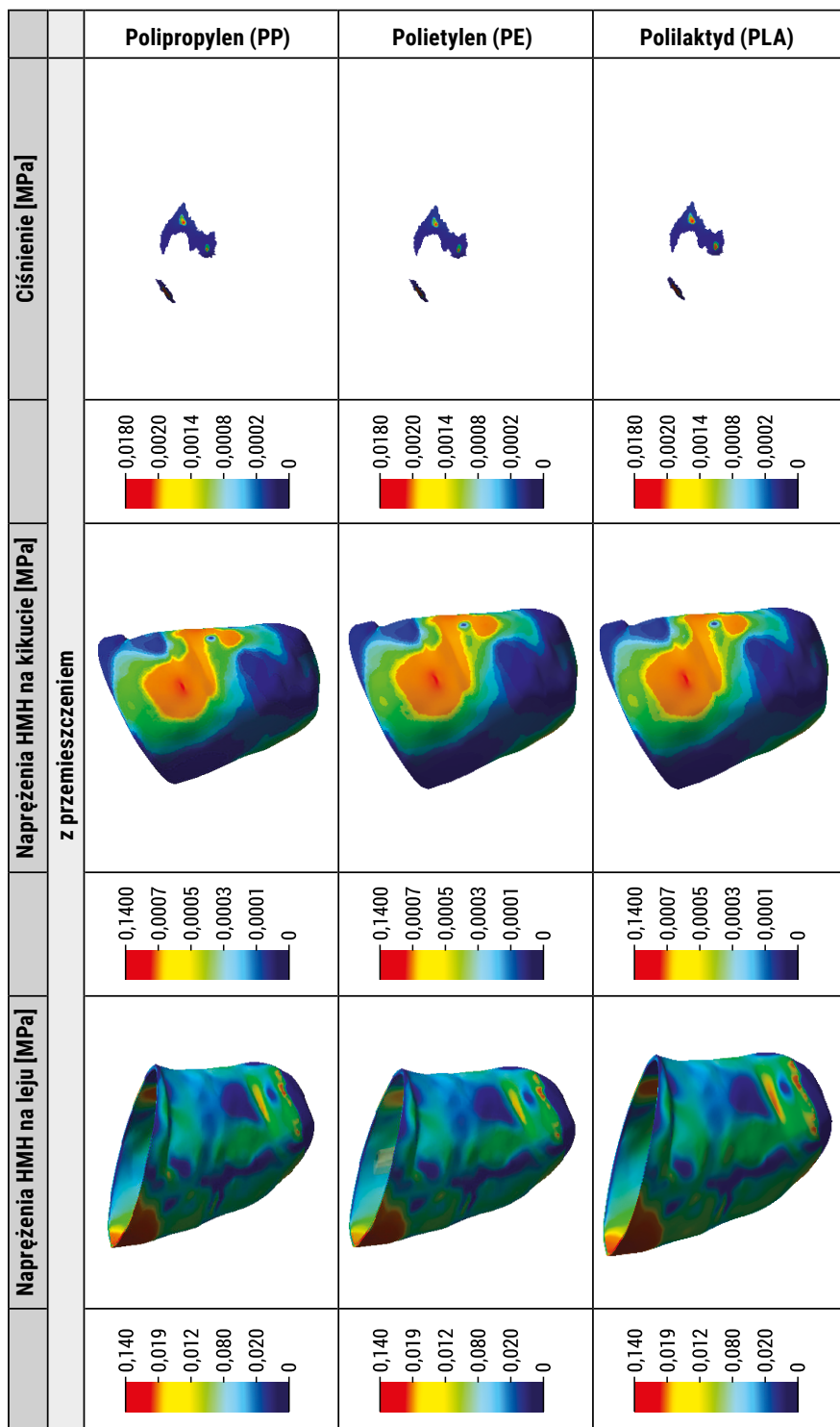
RYS. 3. Porównanie badanych parametrów uzyskanych ze wszystkich wariantów obliczeń

ŹRÓDŁO: opracowanie własne.

Rysunek 4 przedstawia mapy naprężenia HMH oraz ciśnienia występujących na leju i kikucie. Przy każdej mapie dodano skalę wartości, a także oznaczenie wariantu obliczeń.



RYS. 4a. Mapy naprężenia HMM oraz ciśnienia przedstawione dla badanych modeli (bez przemieszczenia leja) w przypadku zastosowania trzech różnych materiałów
 ŹRÓDŁO: opracowanie własne.



RYS. 4b. Mapy naprężenia HMM oraz ciśnienia przedstawione dla badanych modeli (z przemieszczeniem leja) w przypadku zastosowania trzech różnych materiałów

ŹRÓDŁO: opracowanie własne.

6. Podsumowanie

W przedstawionym badaniu autorzy skoncentrowali się na analizach numerycznych lejów protezowych umieszczonych na kikucie z wyłuszczeniem w stawie kolanowym. Uwzględniono dwie zmienne – przemieszczenie leja lub jego brak – a także materiały leja (polipropylen, polietylen, polilaktyd), które używane są do produkcji lejów protezowych. Materiały wykorzystane w badaniach różnią się pod względem właściwości mechanicznych (wytrzymałościowych i odpornościowych). W obliczeniach autorzy skupili się na analizie naprężenia Hubera–Misesa–Hencky’ego powstającego na leju oraz kikucie, ciśnieniu, jak też sile reakcji.

Uzyskane wyniki ukazują znaczące różnice między modelami bez przemieszczenia, a tymi z przemieszczeniem leja. Analiza stanu naprężenia Hubera–Misesa–Hencky’ego pozwala identyfikować obszary, w których struktura jest najbardziej narażona na deformacje plastyczne. Dzięki tym wynikom można także wytypować potencjalne miejsca uszkodzeń leja. Porównując naprężenia widoczne na leju, zaobserwowano sześciokrotnie niższe wartości naprężenia dla modeli bez przemieszczenia leja (PP – 0,105 MPa, PE – 0,108 MPa, PLA – 0,109 MPa) niż dla modeli z przemieszczeniem leja (PP – 0,608 MPa, PE – 0,569 MPa, PLA – 0,578 MPa). W przypadku kikuta widoczne są trzykrotnie niższe wartości naprężenia dla modeli bez przemieszczenia leja (PP – 0,110 MPa, PE – 0,108 MPa, PLA – 0,112 MPa) niż dla modeli z przemieszczeniem leja (0,354 MPa, PE – 0,348 MPa, PLA – 0,367 MPa).

Wyznaczone ciśnienie pozwala ocenić rozkład sił na powierzchni, dzięki czemu możliwa jest ocena miejsc narażonych na duże naciski, a za tym idzie deformacje i uszkodzenia. Siła reakcji (tarcia) między lejem a kikutem jest używana do określenia reakcji struktury na przyłożone siły. Różnice w wartościach dla otrzymanych ciśnień, które występują na badanych strukturach dla modeli z przemieszczeniem (odpowiednio ciśnienie dla modeli bez przemieszczenia: PP – 0,004 MPa, PE – 0,004 MPa, PLA – 0,004 MPa, ciśnienie dla modeli z przemieszczeniem: PP – 0,055 MPa, PE – 0,078 MPa, PLA – 0,068 MPa), są zauważalne (nawet dwudziestokrotnie wyższe). Natomiast siły reakcji osiągają wartości znacząco niższe dla modeli bez przemieszczenia leja (odpowiednio siła reakcji dla modeli bez przemieszczenia: PP – 0,002 N, PE – 0,001 N, PLA – 0,003 N; siła reakcji dla modeli z przemieszczeniem leja: PP – 4,802 N, PE – 4,742 N, PLA – 4,801 N).

Analizując mapy naprężeń lejów protezowych, można zauważyć, że najwyższe naprężenia powstają na przodzie i tyle leja w części proksymalnej. Ta tendencja występuje we wszystkich przypadkach poddanych analizie. Przeciwna sytuacja pojawia się w kontekście naprężeń na modelu kikuta. Najwyższe wartości naprężeń obserwuje się na jego bocznych fragmentach środkowej części. Najniższe naprężenia są w przedniej i proksymalnej części w obszarze, gdzie na leju zaobserwowano jego maksimum. Analizując ciśnienie powstałe na połączeniu kikuta z lejem, widoczne jest, że najwyższe wartości wystąpiły w części dystalnej, a najniższe na jego proksymalnej części, co nastąpiło we wszystkich badanych przypadkach.

Uszkodzenie skóry powstaje przy ciśnieniu w granicy 4–23 kPa, przy współczynniku tarcia 0,5 i przy 22–118 cyklach obciążenia. Przy czym próg wytrzymałości i próg bólu są subiektywne i różnią się w zależności od osoby [20, 21]. Uzyskane wyniki ciśnienia dla przypadku z przemieszczeniem leja przekraczają wartości powstania uszkodzeń skóry, dlatego uzasadnione jest użycie pończochy. Pozwoli ona ochronić skórę przed otarzeniami oraz powstałymi wskutek ich ranami.

Podsumowując, przeprowadzone badania pozwalają na lepsze zrozumienie zachowania się połączenia lej protezowy–kikut. Różnice w konkretnych wynikach badanych przez autorów parametrów są bardzo małe. Wynika z tego, iż użyte tworzywo (PE, PP, PLA) nie ma większego wpływu na zachowanie się struktur. Samo badanie pozwala zrozumieć zachowanie się badanego połączenia.

Literatura

- [1] Pirouzi G., Abu Osman N.A., Eshraghi A., Ali S., Gholizadeh H., Wan Abas W.A., *Review of the socket design and interface pressure measurement for transtibial prosthesis*, „Scientific World Journal” 2014, 2014, 849073.
- [2] Paternò L., Ibrahimi M., Gruppioni E., Menciassi A., Ricotti L., *Sockets for limb prostheses: a review of existing technologies and open challenges*, „IEEE Transactions on Bio-Medical Engineering” 2018, nr 65(9), s. 1996–2010.
- [3] Sanders J.E., Fatone S., *Residual limb volume change: systematic review of measurement and management*, „The Journal of Rehabilitation Research and Development” 2011, nr 48(8), s. 949.
- [4] Paprocka-Borowicz M., Fiodorenko-Dumas Ż., *Rodzaje lejów protezowych stosowane po amputacji udowej kończyny dolnej*, „Chirurgia Polska” 2013, nr 15(1), s. 66–71.
- [5] Pogorzała A., Rohde A., *Przyczyny, rodzaje i poziomy amputacji kończyn dolnych* [w:] A.M. Borowicz, *Fizjoterapia – wiedza i doświadczenie*, Wydawnictwo Wyższej Szkoły Edukacji i Terapii im. prof. Kazimierzy Milanowskiej, Poznań 2018, s. 35–46.
- [6] Meulenbelt H.E., Geertzen J.H., Jonkman M.F., Dijkstra P.U., *Skin problems of the stump in lower-limb amputees: 2. Influence on functioning in daily life*, „Acta Dermato-Venereologica” 2011, nr 91(2), s. 178–182.
- [7] Dudek N.L., Marks M.B., Marshall S.C., Chardon J.P., *Dermatologic conditions associated with use of a lower-extremity prosthesis*, „Archives of Physical Medicine and Rehabilitation” 2005, nr 86(4), s. 659–663.
- [8] Gariboldi F., Pasquarelli D., Cutti A.G., *Structural testing of lower-limb prosthetic sockets: A systematic review*, „Medical Engineering & Physics” 2022, nr 99, 103742.
- [9] Ciemny K., *Dlaczego medycyna potrzebuje druku 3D?*, „Medical Robotics Reports” 2017, nr 6, s. 71–77.
- [10] Brynkus A., Łagan S., *Analiza stanu naprężeń w wybranych lejach protezowych kończyny dolnej z wykorzystaniem metod elementów skończonych*, „Aktualne Problemy Biomechaniki” 2015, nr 9, s. 19–24.
- [11] Henao S.C., Orozco C., Ramírez J., *Influence of gait cycle loads on stress distribution at the residual limb/socket interface of transfemoral amputees: A finite element analysis*, „Scientific Reports” 2020, nr 10(1), 4985.
- [12] Lee W.C., Zhang M., *Using computational simulation to aid in the prediction of socket fit: A preliminary study*, „Medical Engineering & Physics” 2007, nr 29(8), s. 923–929.

- [13] Pirouzi G., Abu Osman N.A., Eshraghi A., Ali S., Gholizadeh H., Wan Abas W.A.B., *Review of the socket design and interface pressure measurement for transtibial prosthesis*, „The Scientific World Journal” 2014.
- [14] www.utmb.edu/ [dostęp: 27.12.2023].
- [15] www.ineos.com/ [dostęp: 27.12.2023].
- [16] Będziński R., *Biomechanika inżynierska*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 1997.
- [17] Dao T.T., Tho M.C.H.B., *A systematic review of continuum modeling of skeletal muscles: current trends, limitations, and recommendations*, „Applied Bionics and Biomechanics” 2018.
- [18] Frauziols F., Badel P., Navarro L., Molimard J., Curt N., Avril S., *Subject-specific computational prediction of the effects of elastic compression in the calf* [w:] *Biomechanics of Living Organs*, red. Y. Payan, J. Ohayon, Academic Press, London 2017, s. 523–544.
- [19] Henao S.C., Orozco C., Ramírez J., *Influence of gait cycle loads on stress distribution at the residual limb/socket interface of transfemoral amputees: A finite element analysis*, „Scientific Reports” 2020, nr 10(1), 4985.
- [20] Sanders J.E., Daly C.H., Burgess E.M., *Interface shear stresses during ambulation with a below-knee prosthetic limb*, „Journal of Rehabilitation Research and Development” 1992, nr 29 (4), s. 1–8.
- [21] Tsiokos D., Kanellios G.T., Papaioannou G., Pissadakis S., *Fiber Optic-Based Pressure Sensing Surface for Skin Health Management in Prosthetic and Rehabilitation Interventions* [w:] *Biomedical Engineering – Technical Applications in Medicine*, red. R. Hudak, M. Penhaker, J. Majernik, InTech Open 2012, s. 245–262.

Tajniki smaku.

Część 1: Analiza tekstury przekąsek

*Izabela Borawska, Kinga Koziak, Milena Janusz,
Żaneta Hościło, Piotr Tarasewicz, Magdalena Joka Yildiz
Politechnika Białostocka, Koło Naukowe Rolka
idrzazgowska99@wp.pl*

Summary: This study aimed to analyze the texture of three food groups: crackers, coated nuts, and chips, taking into account the destructive force of the samples, using compression and bending tests. The tests were conducted on two price categories of products. The analysis results showed differences in the sensory characteristics and texture of the samples. Texture analysis showed that the fat content had a significant effect on the hardness and crispness of the products, i.e. higher fat content translated into higher product hardness.

Keywords: texture analysis, snacks, fat content, hardness

1. Wstęp

Tekstura jest jednym z głównych i najbardziej istotnych kryteriów stosowanych przez konsumentów do oceny jakości i świeżości żywności. Teksturę żywności ocenia się na podstawie jej właściwości mechanicznych, takich jak: zdolność do rozpuszczania się, rozciągania lub łamania, zginania. Często konsument dokonuje tego podświadomie. Z punktu widzenia sensorycznego tekstura żywności oceniana jest podczas żucia. Zęby, język i szczęka wywierają siłę na jedzenie, a to, jak łatwo rozpuszcza się w ustach lub łamie, decyduje o tym, czy jest postrzegane jako twarde, kruche, grube, lepkie itd. [1].

Rozbieżność w zdefiniowaniu tekstury żywności wynika z faktu, że istnieje szeroka gama pokarmów o wielu cechach tekstury i różnych metodach opisu. W związku z tym do określania właściwości teksturowych produktów żywnościowych stosowano rozmaite terminologie. Oceniając tekstury produktów żywnościowych, ważne jest, aby przyjąć obiektywne, standardowe metody pomiaru [2].

Instrumentalna ocena tekstury jest wykonywana za pomocą analizatora tekstury (teksturometru). Polega na pomiarze reakcji żywności na działanie siły, takiej jak cięcie, ścinanie, żucie, ściskanie lub rozciąganie, oraz pomiarze twardości, kruchości, słabości, przyczepności itp. Analizatory stosowane są do imitowania bądź tworzenia kontrolowanych naprężeń w próbce, imitując konsumpcję albo użycie produktu. Na rynku można znaleźć urządzenia, do których dostępna jest szeroka gama uchwytów (sond) do badania tekstury żywności i które zapewniają duży zakres możliwości jej mechanicznej analizy. Testy tego typu znajdują zastosowanie zwłaszcza w przemyśle spożywczym do pomiaru tekstury oraz rutynowej kontroli stanu produktów. W rozumieniu producenta analiza tekstury żywności może polegać na ocenie funkcjonalności składnika w procesie produkcyjnym lub jego wpływu na produkt końcowy. Z perspektywy klienta analiza żywności pod kątem percepcji zmysłów może być kluczową oceną w celu zapewnienia przewidywanych albo oczekiwanych właściwości sensorycznych, jakości funkcjonalności produktu [3].

Przekąski są często uważane za niewielką ilość jedzenia spożywanego między posiłkami bądź jako rodzaj żywności gotowej do spożycia, która nie wymaga czasochłonnego przygotowania. W zależności od literatury definicja przekąsek opiera się na porze dnia, w której są spożywane, rodzaju lub ilości spożywanego pokarmu, a nawet miejscu spożycia [4–5].

Celem pracy było określenie różnic w teksturze w obrębie trzech grup przekąsek: chipsów, orzeszków i krakersów. Badania zostały przeprowadzone z zastosowaniem nowoczesnych technik pomiarowych zintegrowanych z oprogramowaniem komputerowym, co pozwoliło na obiektywne porównanie analizowanych grup artykułów spożywczych. Cel pracy został osiągnięty poprzez określenie siły niszczącej daną próbkę spożywczą z zastosowaniem testów ściskania i zginania indywidualnie dla każdej grupy produktów.

2. Materiał i metodyka badań

2.1. Materiał

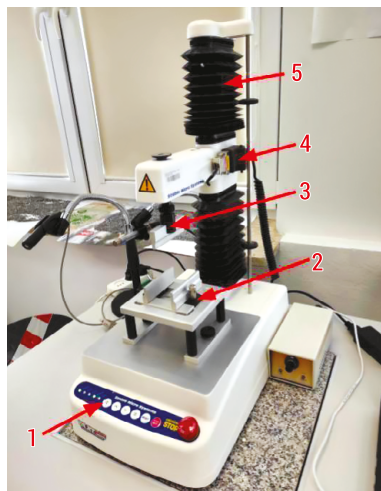
Materiał badawczy stanowiły trzy rodzaje popularnych przekąsek:

- chipsy ziemniaczane,
- krakersy,
- orzeszki w panierce.

W każdej grupie badaniu poddano dwa rodzaje produktów. Pierwszy rodzaj stanowiły wytwory o wysokiej popularności (liderzy rynku), drugi zaś został zakupiony w popularnym dyskoncie i stanowił produkt własny sieci sklepów.

2.2. Metodyka badań

Analiza tekstury przeprowadzona została na analizatorze tekstury TA.XT Texture Analyzer firmy Stable Micro Systems (rys. 1).



RYS. 1. Urządzenie do badania tekstury: 1 – kontroler z wyłącznikiem, 2 – platforma pomiarowa, 3 – przyrząd pomiarowy, 4 – ogniwo obciążnikowe, 5 – suwnica

ŹRÓDŁO: zdjęcie i opracowanie własne.

Każdorazowo do wykonania badania tekstury przekąsek dobrano odpowiednie przystawki lub zestawy pomiarowe, które były montowane na platformie pomiarowej (2) oraz w uchwycie przyrządu pomiarowego (3). Poprzez ruch przyrządu pomiarowego (3) po suwnicy (5) wymuszano deformację bądź zniszczenie badanej próbki. Rejestrowany opór stawiany przez badaną próbkę był przetwarzany przez oprogramowanie Exponent i widoczny na ekranie komputera w postaci wykresu. Po wykonaniu zadanej ilości powtórzeń obliczono poszczególne właściwości tekstury, do czego również wykorzystano oprogramowanie Exponent. Główne właściwości techniczne teksturometru TA.XT Texture Analyzer podano w tabeli 1.

TABELA 1. Specyfikacja techniczna teksturometru TA.XT Texture Analyzer

Cecha	Wartość
Nacisk maksymalny	50 N
Zakres pracy	0,01–135 mm
Maksymalna prędkość narzędzia	10 mm/s
Minimalna prędkość narzędzia	0,1 mm/s
Waga	13 kg

ŹRÓDŁO: opracowanie własne.

Wytrzymałość na zginanie sztywnych próbek można określić, wykonując trzypunktowy test zginania. Opisane urządzenie podtrzymuje próbkę na rozpiętości o znanej odległości. Siła jest przykładana do środka próbki (który jest również centralny dla podpór) i określa się naprężenie zrywające.

Próbkę (jednego krakersa) umieszczano na platformie do gięcia trzypunktowego, następnie z poziomu oprogramowania Exponent dobierano metodę służącą do analizy próbki. Pomiar został powtórzony min. 10-krotnie dla każdego rodzaju krakersów.

Do badania twardości i chrupkości orzeszków stosowana była sonda w kształcie walca, która służy do ściskania produktów. Montowana jest ona na zasadzie wkręcania w wyznaczone w tym celu miejsce na ramieniu tekstuometru. Jako podstawa pomiarowa służyła platforma HDP/90 Heavy Duty. Orzeszki zostały zbadane poprzez bezpośrednie umieszczenie ich na platformie pomiarowej. W przypadku chipsów, ze względu na ich wysoką nieregularność kształtu oraz użycie do badania więcej niż jednej sztuki, zastosowano plastikowy pojemnik o średnicy nieco większej niż średnica sondy, który wypełniono materiałem badawczym. Zestaw do przeprowadzania badania siły ściskającej orzeszków i chipsów przedstawiono na rys. 2.



RYS. 2. Zestaw do badania siły ściskającej chipsy i orzeszki

ŹRÓDŁO: zdjęcie własne.

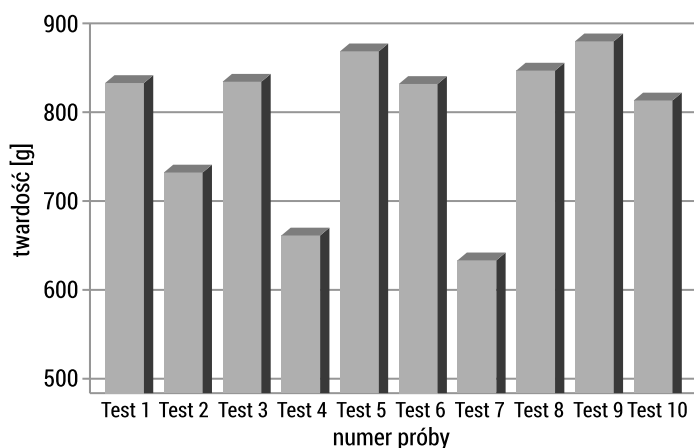
Po wykonaniu min. 10 powtórzeń badania dla każdego z materiałów dane zostały opracowane i przeliczone zgodnie z metodyką podaną przez oprogramowanie Exponent.

3. Wyniki badań i dyskusja

3.1. Analiza tekstury

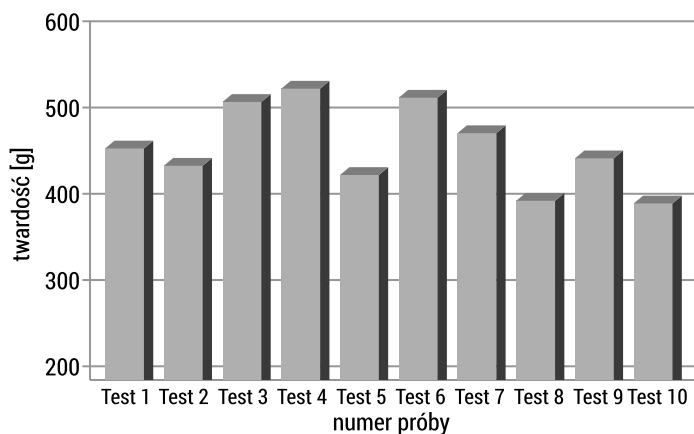
3.1.1. Krakersy

W obrębie badanych grup produktów uzyskano pewną zmienność wyników twardości, co obrazują rys. 3–4. Zróżnicowanie może wynikać z czynników takich jak nierównomierne wypiekanie, nierównomierne natłuszczenie oraz różnice w grubości poszczególnych krakersów.



RYS. 3. Poziom twardości krakersów K1

ŹRÓDŁO: opracowanie własne.

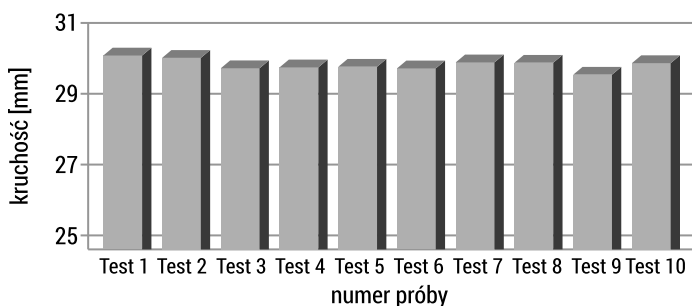


RYS. 4. Poziom twardości krakersów K2

ŹRÓDŁO: opracowanie własne.

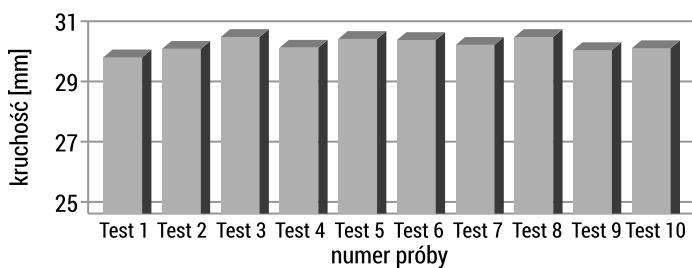
W przypadku próby K1 (zawartość tłuszczu 21%) średnia twardość wynosiła $803,25 \pm 86,76$ g, a dla próbek K2 (zawartość tłuszczu 17%) było to $463,80 \pm 41,13$ g (rys. 3–4). Tym samym mogą istnieć inne czynniki wpływające na omawiany parametr tekstury.

Kolejnym badanym parametrem tekstury podczas trójpunktowego zginania jest kruchość, która świadczy o tym, na jaką odległość można odkształcić próbkę przed jej pęknięciem. Zmienność tego parametru w obu badanych wariantach przedstawiono na rys. 5–6. Charakteryzuje się on niewielką zmiennością w obrębie prób, co świadczy o zbliżonym, powtarzalnym kształcie analizowanych krakersów. Wartość kruchości oscylowała w okolicy 30 mm. Zaobserwowano niewielkie różnice w odchyleniu standardowym od średniej, które wynosiło 0,16 mm dla próby K1 (wyższa regularność kształtu) i 0,22 mm dla K2.



RYS. 5. Kruchość krakersów K1

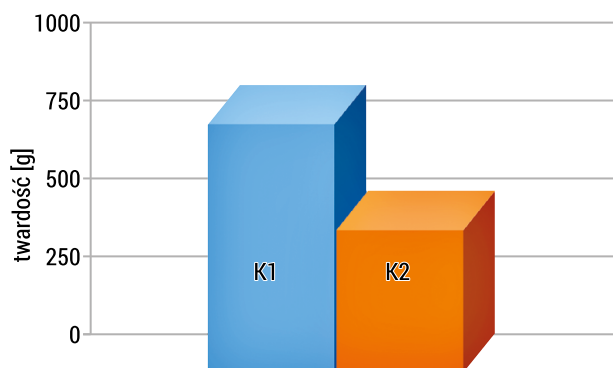
ŹRÓDŁO: opracowanie własne.



RYS. 6. Kruchość krakersów K2

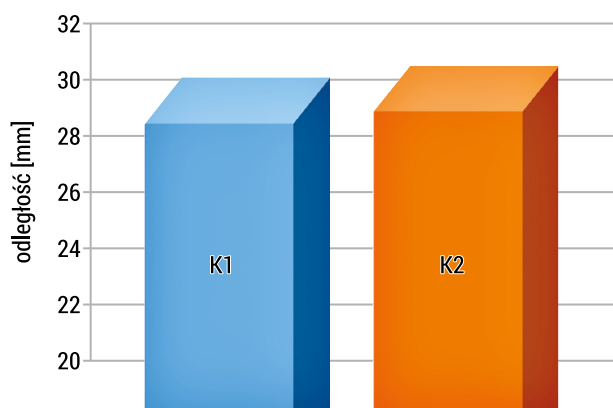
ŹRÓDŁO: opracowanie własne.

Jak podają Sudha i in. [6], istotny wpływ na twardość kruchych wyrobów piekarniczych ma zawartość tłuszczu – im jest wyższa, tym obserwuje się niższą wartość twardości. Jednak w przypadku badanych krakersów wyższą twardością charakteryzowały się te o niższej zawartości tłuszczu (rys. 7). Wykresy słupkowe zaprezentowane na rys. 7–8 przedstawiają porównanie średnich wartości dla parametrów twardości i kruchości krakersów. Krakersy K1 wykazują wyższy średni poziom twardości i niższy średni poziom kruchości niż krakersy K2.



RYS. 7. Średnia twardość krakersów K1 i K2

ŹRÓDŁO: opracowanie własne.



RYS. 8. Średnia kruchość krakersów K1 i K2

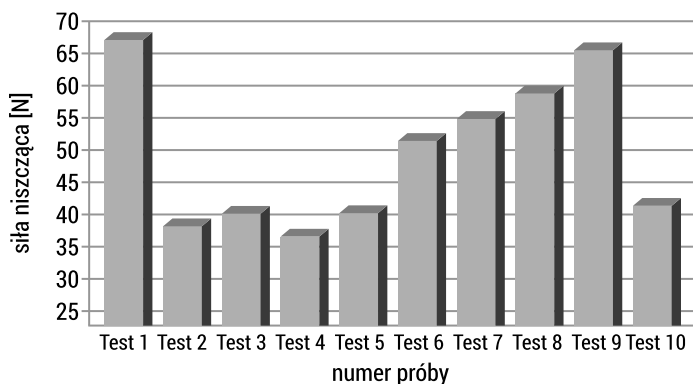
ŹRÓDŁO: opracowanie własne.

Należy zaznaczyć, że pod względem wizualnym korzystniej oceniono krakersy K1, ponieważ mają wyższą regularność kształtu oraz bardziej równomierny poziom wybarwienia niż krakersy K2. Proces technologiczny wytwarzania krakersów K1 może mieć wpływ na poziom twardości produktu, a widocznym tego znakiem może być struktura K1. W aspekcie cenowym tańsze krakersy K2 charakteryzują się niższą twardością, jednak zbliżoną kruchością do K1. Uzyskane wyniki badań potwierdzają potrzebę przeprowadzenia dalszych analiz porównawczych produktów, np. poprzez badanie opinii konsumentów w formie ankiety oceniającej te przekąski.

3.1.2. Orzeszki w panierce

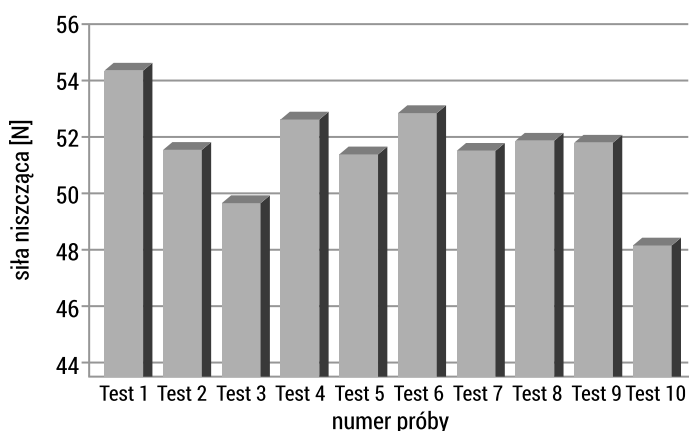
W obrębie badanych grup produktów uzyskano pewną zmienność wyników siły niszczącej, co obrazują rys. 9–10. Zróżnicowanie może wynikać z czynników takich jak różnice w wielkości poszczególnych orzechów i ich kształcie, różne położenie na urządzeniu, a także zróżnicowana twardość orzechów. W przypadku próby O1

średnia wartość siły niszczącej orzech wynosiła $50,64 \pm 11,65$ N, a dla próbek O2 było to $51,86 \pm 12,24$ N. Wartość średnia siły niszczącej dla prób O1 i O2 oscyluje więc w granicach 51 N.



RYS. 9. Siła niszcząca orzech dla próby O1

ŹRÓDŁO: opracowanie własne.

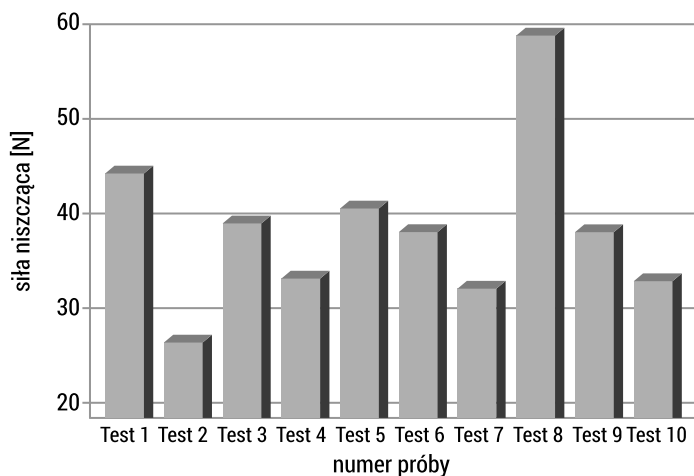


RYS. 10. Siła niszcząca orzech dla próby O2

ŹRÓDŁO: opracowanie własne.

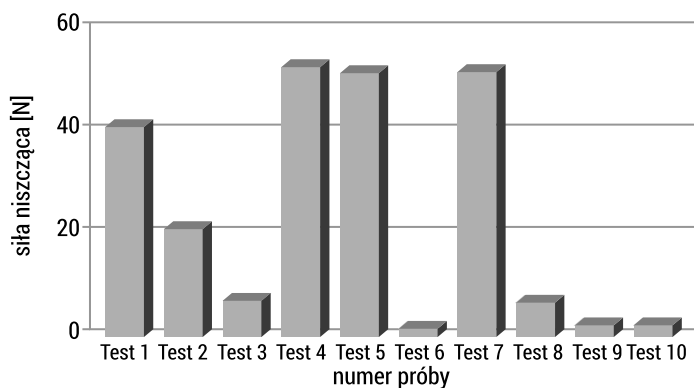
Kolejnym badanym parametrem tekstury podczas ściskania sondą jest siła niszcząca [N] panierki. Jego nieregularność w obu badanych wariantach umieszczono na rys. 11–12. Parametr ten charakteryzuje się dużą zmiennością w obrębie prób, co świadczy o znacznych odchyleniach kształtu i wielkości panierki znajdującej się na poszczególnych orzechach, a także jej twardości i składzie. Wartość siły niszczącej panierki O1 (zawartość tłuszczu 36%) wynosiła średnio 39,17 N, a dla panierki O2 (zawartość tłuszczu 29%) 23,82 N. Zaobserwowano znaczne różnice w odchyleniu standardowym od średniej, które wynosiło 8,82 N dla próby O1 i 23,643 N dla O2, co świadczy o dużym zróżnicowaniu kształtu oraz wysokiej niejednorodności

produktu O2. Ponadto zgodnie z informacją podaną przez producentów przekąsek O1 i O2 w produkcie O2 zawartość orzechów jest wyższa o 1% niż w O1. Tym samym świadczy to o niższej zawartości panierki w O2.



RYS. 11. Siła niszcząca panierkę dla próby O1

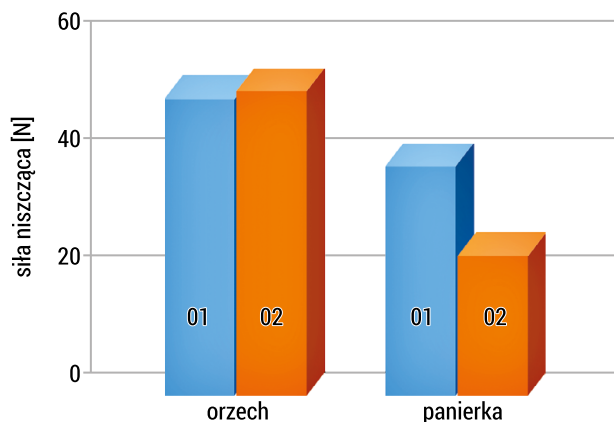
ŹRÓDŁO: opracowanie własne.



RYS. 12. Siła niszcząca panierkę dla próby O2

ŹRÓDŁO: opracowanie własne.

Na rys. 13 porównano średnie wartości sił niszczących orzech oraz panierkę dla prób O1 i O2. Jak podają Mohammadi Moghaddam i in. [7], na twardość orzechów może wpływać proces technologiczny ich prażenia: im wyższa temperatura prażenia orzechów, tym twardość jest niższa. Stąd można wnioskować, że powodem zróżnicowania w obrębie orzechów O1 i O2 może być niewielka różnica w procesie produkcyjnym. Jednak wpływ na parametr twardości orzechów może mieć również rodzaj partii produktu, na który składają się: plantator, czas zbioru, nawożenie, środki ochrony roślin itd. [8].



RYS. 13. Średnia wartość siły niszczącej orzech i panierkę 01 i 02

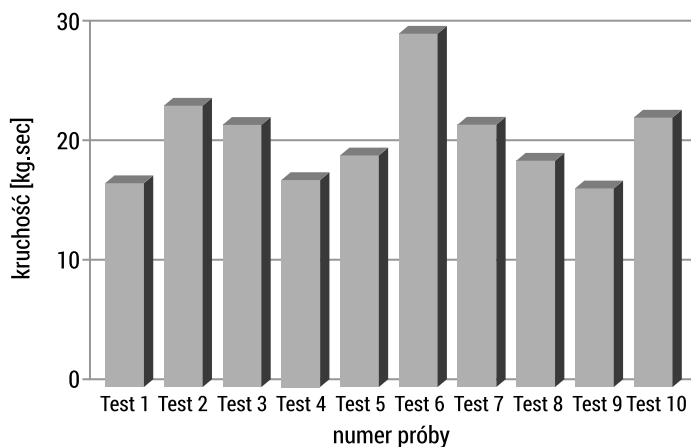
ŹRÓDŁO: opracowanie własne.

Panierka w obu próbach była mniej odporna na działanie siły niszczącej niż sam orzech (niższa wartość siły niszczącej). Oba produkty znacząco różnią się od siebie pod względem tekstury panierki – dla próby 02 uzyskano znacznie niższe wartości twardości panierki względem próby 01. Tak jak w przypadku krakersów, tak i przy panierce orzechów im wyższa zawartość tłuszczu, tym większa siła jest niezbędna do zniszczenia próby.

Orzeszki w panierce zostały również poddane subiektywnej ocenie konsumenciej przez jedną z autorek niniejszej pracy oraz jej najbliższe otoczenie. Stwierdzono, że pod względem wizualnym produkt 01 był atrakcyjniejszy, produkt 02 charakteryzował się grubszą warstwą panierki i mniej wyrazistym smakiem.

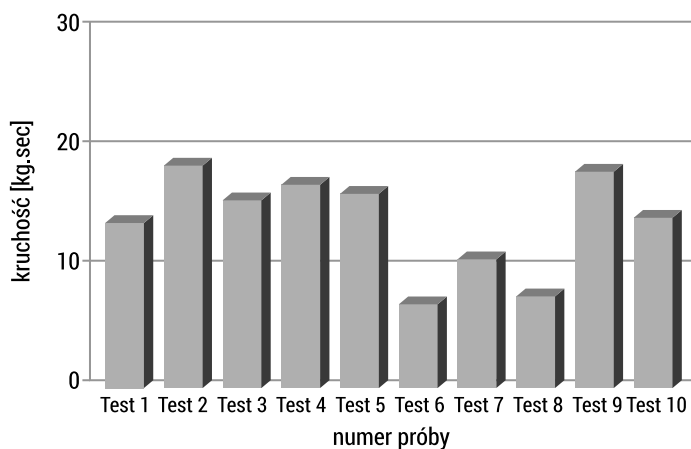
3.1.3. Chipsy ziemniaczane

W obrębie badanych grup produktów zaobserwować można spore rozbieżności co do wartości kruchości (rys. 14–15). Średnia kruchość chipsów C1 wynosiła $20,93 \pm 3,92$ kg/sec, dla C2 wartość była równa $13,94 \pm 4,17$ kg/sec. Rozbieżność w poziomach kruchości poszczególnych prób może wynikać ze zróżnicowanej wielkości i grubości chipsów, z różnego stopnia wysmażenia, a także z zawartości składników odżywczych w partii ziemniaków, z której zostały wyprodukowane, i składników recepturowych użytych podczas produkcji. Jednym ze składników jest tłuszcz. Jego zawartość w produkcie C1 wynosi 34%, w C2 35%. Jak podają Wroniak i in. [9], rodzaj użytego do smażenia tłuszczu ma istotny wpływ na teksturę przekąsek, tak więc zastosowanie trzech różnych rodzajów olejów (słonecznikowego, kukurydzianego i rzepakowego w zmiennych porcjach) do smażenia chipsów C1 wpłynęło na zmianę jakości ich tekstury w porównaniu z C2, które według informacji producenta zostały wysmażone wyłącznie na oleju słonecznikowym. W tym miejscu należy zaznaczyć, iż chipsy C1 charakteryzują się wyższym poziomem kruchości niż C2. Po poddaniu ich ocenie sensorycznej przez autorkę pracy i jej najbliższe otoczenie uznano, iż pod względem oceny wizualnej nie różnią się w znaczny sposób.



RYS. 14. Kruchość chipsów C1

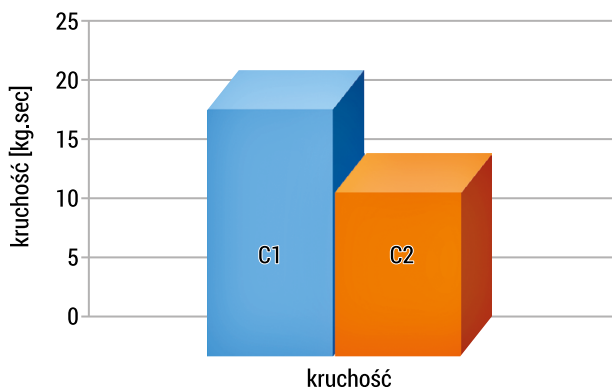
ŹRÓDŁO: opracowanie własne.



RYS. 15. Kruchość chipsów C2

ŹRÓDŁO: opracowanie własne.

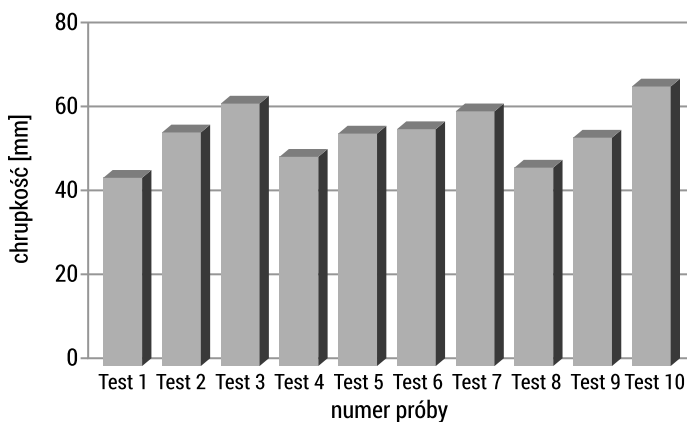
Jak podają Pobereźny i in. [10], na jakość chipsów w dużej mierze wpływają zawartość skrobi w bulwach ziemniaka użytego do produkcji oraz okres przechowywania bulw. Im wyższy poziom skrobi, tym wykazują one wyższą twardość, a wraz z wydłużeniem czasu przechowywania bulw zmniejsza się procentowy udział skrobi, co skutkuje mniejszą jej zawartością w gotowym produkcie. Zawartość skrobi powinna wynosić od 16% do 21%, a dla odmian wczesnych – przynajmniej 12%. Lisińska podaje, iż przy większej zawartości tego składnika produkt jest zbyt twardy, przy mniejszej zaś zbyt tłusty i mało chrupki [11]. Można przypuszczać, iż chipsy C1 zawierają większy procentowy udział skrobi w składzie, ponieważ cechuje je wyższy poziom kruchości od chipsów C2 (rys. 16).



RYS. 16. Średnia kruchość chipsów C1 i C2

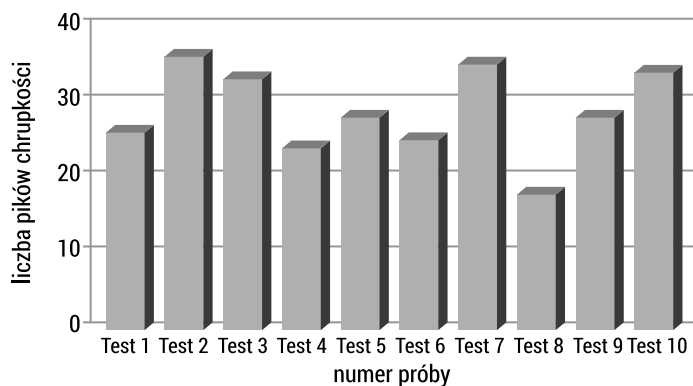
ŹRÓDŁO: opracowanie własne.

Kolejnym parametrem badanym podczas określania tekstury jest chrupkość / liczba pików chrupkości. Jak wynika z rys. 17–18, średni poziom chrupkości chipsów C1 wynosi $55,5 \pm 6,77$ mm, a liczba pików chrupkości ma wartość $28,7 \pm 5,75$. Dla C2 wartości te wynoszą odpowiednio $38,77 \pm 5,27$ mm i $17,4 \pm 4,14$ (rys. 19–20). Tak jak podczas badania poziomu kruchości, tak i w tym przypadku na poziom chrupkości wpływają te same parametry materiałowe. Jak wynika z rys. 21, chipsy C1 cechuje wyższy poziom chrupkości względem C2.



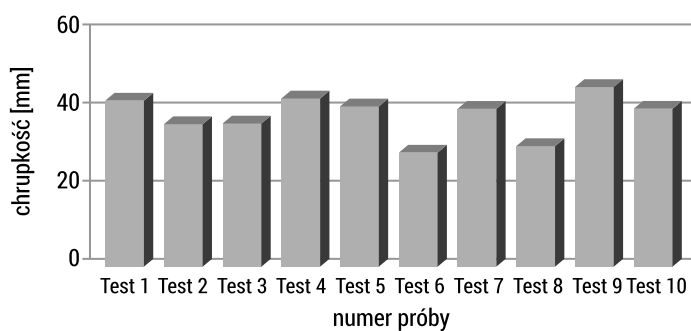
RYS. 17. Chrupkość chipsów C1

ŹRÓDŁO: opracowanie własne.



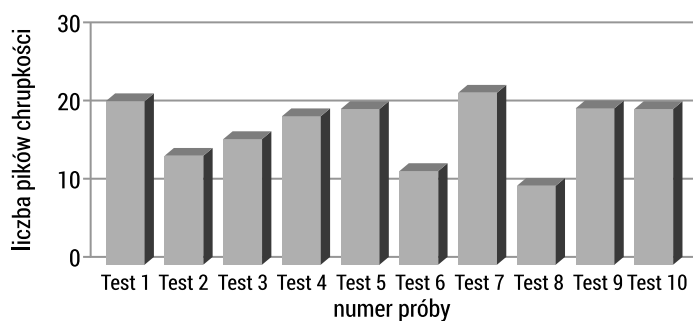
RYS. 18. Liczba pików chrupkości chipsów C1

ŹRÓDŁO: opracowanie własne.



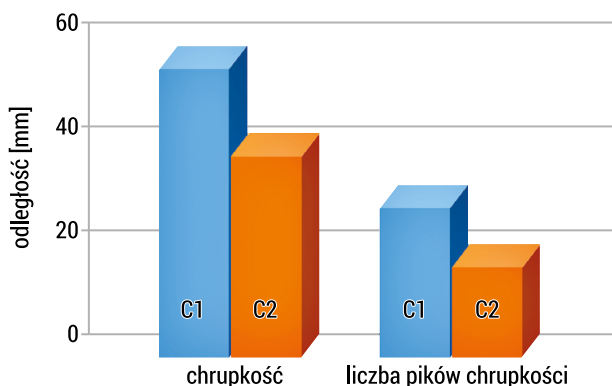
RYS. 19. Chrupkość chipsów C2

ŹRÓDŁO: opracowanie własne.



RYS. 20. Liczba pików chrupkości chipsów C2

ŹRÓDŁO: opracowanie własne.



RYS. 21. Średnia chrupkość i liczba pików chrupkości chipsów C1 i C2

ŹRÓDŁO: opracowanie własne.

Należy zaznaczyć, iż podczas subiektywnej oceny sensorycznej przeprowadzonej za pomocą dotyku stwierdzono, że tekstura chipsów C2 w porównaniu z teksturą C1 sprawia wrażenie tłustszej (odnotowano więcej tłuszczu na palcach osób badających) i wyraźnie bardziej kruchej (produkt kruszył się podczas chwytania dłonią).

4. Podsumowanie i wnioski

Celem niniejszej pracy była analiza tekstury wybranych trzech grup spożywczych z zastosowaniem indywidualnie do nich dobranych testów ściskania i zginania. Jako obiekt badań wybrano trzy rodzaje popularnych przekąsek: krakersy, orzechy w panierce oraz chipsy ziemniaczane z dwóch kategorii cenowych: produkt droższy popularnej marki oraz produkt tańszy dostępny w sieci sklepów dyskontowych. Dobrano urządzenia pomiarowe i zwalidowano metodę badawczą dla każdej z przekąsek. Po wykonaniu badań dla każdej z próbek wyniki przedstawiono w postaci wykresów słupkowych. Szczegółowa analiza każdego z nich doprowadziła do następujących wniosków.

Analiza cech sensorycznych pozwoliła określić różnice w wyglądzie poszczególnych próbek badawczych:

- krakersy K1 miały bardziej równomierne wybarwienie niż krakersy K2,
- orzechy w panierce O1 były zauważalnie mniejsze niż orzeszki O2,
- chipsy C2 sprawiały wrażenie bardziej kruchych względem C1.

Analiza tekstury pozwoliła dowiedzieć, że rodzaj tłuszczu i jego procentowy udział w składzie przekąsek wyraźnie wpływają na jego zawartość w przekąskach i ich teksturę.

Krakersy K1, w których składzie odnotowano wyższą procentową zawartość tłuszczu, cechowały się wyższym poziomem twardości próbek, co świadczy o bezpośrednim wpływie zawartości tłuszczu na parametr twardości (pozostałe wartości odżywcze były na zbliżonym poziomie dla K1 i K2). Dla obu rodzajów krakersów poziom kruchości oscylował na podobnym poziomie, a wartość odchylenia standardowego różniła się jedynie o 0,08 mm. Krakersy K1 miały bardziej wyrównaną teksturę niż K2 i uzyskano dla nich niższe odchylenie standardowe od średniej.

Panierka O1 cechowała się wyższą odpornością na działanie siły niszczącej niż panierka O2, gdzie – tak jak w przypadku krakersów – bezpośredni wpływ miała procentowa zawartość tłuszczu w składzie.

Analiza tekstury z zastosowaniem teksturometru umożliwia precyzyjne określenie właściwości mechanicznych produktów spożywczych oraz przedstawienie uzyskanych wyników w postaci danych matematycznych. Dzięki skomputeryzowanej analizie tekstury możliwe jest wykluczenie subiektywnego czynnika ludzkiego (preferencji konsumenckich) w ocenie jakości produktów spożywczych i uzyskanie wiarygodnych danych pomiarowych.

Literatura

- [1] Marzec A., *Tekstura żywności*, „Przemysł Spożywczy” 2007, t. 61, nr 5, s. 6–10.
- [2] Lu R., *Principles of solid food texture analysis* [w:] *Instrumental Assessment of Food Sensory Quality. A Practical Guide*, red. D. Kilcast, Woodhead Publishing, Cambridge 2013, s. 103–128.
- [3] *What is food texture?*, <https://www.stablemicrosystems.com/WhatIsFoodTexture.html> [dostęp: 29.12.2023].
- [4] Hess J., Jonnalagadda S., Slavin J., *What Is a Snack, Why Do We Snack, and How Can We Choose Better Snacks? A Review of the Definitions of Snacking, Motivations to Snack, Contributions to Dietary Intake, and Recommendations for Improvement*, „Advances in Nutrition” 2016, nr 7(3), s. 466–475.
- [5] Hess J.M., Slavin J.L., *Healthy snacks: using nutrient profiling to evaluate the nutrient-density of common snacks in the United States*, „Journal of Food Science” 2017, nr 82(9), s. 2213–2220.
- [6] Sudha M.L., Srivastava A.K., Vetrmani R., Leelavathi K., *Fat replacement in soft dough biscuits: Its implications on dough rheology and biscuit quality*, „Journal of Food Engineering” 2007, nr 80(3), s. 922–930.
- [7] Moghaddam M., Razavi S.M.A., Taghizadeh M., Sazgarnia A., *Sensory and instrumental texture assessment of roasted pistachio nut/kernel by partial least square (PLS) regression analysis: effect of roasting conditions*, „Journal of Food Science and Technology” 2015, nr 53(1), s. 370–380.
- [8] Singh N., Pal N., Mahajan G., Singh S., Shevkani K., *Rice grain and starch properties: Effects of nitrogen fertilizer application*, „Carbohydrate Polymers” 2011, nr 86(1), s. 219–225.
- [9] Wroniak M., Prejs D., Janowicz M., Ratusz K., Kornatowska M., *Wybrane cechy jakościowe przekąsek pszennych i ziemniaczanych smażonych w różnych tłuszczach*, „Postępy Techniki Przetwórstwa Spożywczego” 2016, nr 2, s. 54–61.

- [10] Pobereżny J., Wszelaczyńska E., Wichrowska D., Żary-Sikorska E., Knapowski T., Mozolewski W., Żmijewski W., Pomianowski J., *Właściwości skrobi decydujące o wartości technologicznej ziemniaka*, „Inżynieria i Aparatura Chemiczna” 2015, nr 54(5), s. 273–274.
- [11] Lisińska G., *Wpływ różnych czynników na skład chemiczny bulw ziemniaka i jakość otrzymywanych z nich chipsów*, Wrocław 1981, s. 981 („Zeszyty Naukowe Akademii Rolniczej we Wrocławiu. Rozprawy”, 31).

Tajniki smaku.

Część 2: Analiza jakości miodów

*Mateusz Mackiewicz, Małgorzata Kowczyk-Sadowy,
Jolanta Piekut, Magdalena Joka Yildiz
Politechnika Białostocka, Koło Naukowe Rolka
86550@student.pb.edu.pl*

Summary: The objective of the study was to evaluate honey quality based on specific physicochemical parameters. The honey samples were obtained from three distinct sources: harvested from the author's own apiary, purchased from a supermarket, and directly acquired from a beekeeper in the Podlaskie Voivodeship. The examined kinds of honey were analyzed for various parameters, including water content, water activity, 5-hydroxymethylfurfural (HMF), proline, total acidity, diastase number, pH, specific conductivity, and pollen composition. The findings of the research affirmed that numerous factors during honey production can significantly influence the overall quality of the product.

Keywords: natural honey, honey quality testing, honey pollen analysis

1. Wstęp

Miód naturalny wytwarzany jest przez pszczoły z nektaru lub spadzi. Jest on produktem, który zawiera wiele składników niezbędnych do prawidłowego przebiegu przemiany materii w organizmie człowieka, takich jak węglowodany, kwasy organiczne, enzymy, aminokwasy, biopierwiastki i witaminy [1].

Świeże miody mają konsystencję gęstej, lepkiej cieczy, o barwie od jasnożółtej do żółtobrunatnej, o aromatycznym zapachu i słodkim smaku. Naturalny produkt pszczeli charakteryzuje się określonymi cechami organoleptycznymi oraz bogatym składem chemicznym. Czynnikiem, które odgrywają istotną rolę w utrwalaniu jakości miodów, są: odbieranie miodu z ula, sposób konfekcjonowania oraz przechowywania [1].

W skład nektaru wchodzi przede wszystkim woda i cukry, lecz także wiele innych substancji decydujących o walorach prozdrowotnych. Możemy wyróżnić trzy rodzaje cukrów: glukoza, fruktoza i sacharoza. Inne węglowodany występują w bardzo małych

ilościach. Przewaga glukozy w miodzie przyspiesza proces krystalizacji (np. miód rzepakowy), natomiast większa ilość fruktozy opóźnia proces krystalizacji (np. miód akacjowy) [2].

Spadz jest słodką, lepłą substancją pojawiającą się na liściach drzew. Składa się głównie z wydzielin pluskwików, m.in. mszyc i miodówek, które żywią się sokiem z liści drzew i krzewów [2]. Spadz składa się z wody, cukrów spadziowych, dekstryn oraz składników mineralnych [3].

Zawartość wody w miodzie może się wahać od 16% do 23%. Wpływają na to głównie temperatura i wilgotność otoczenia w trakcie przetwarzania przez pszczoły nektaru, a także warunki atmosferyczne panujące podczas jego pozyskiwania przez człowieka [4]. Miody zawierające znacząco ponad 20% wody uważa się za nie-dojrzałe. Miód powinien zostać odebrany z ula w stanie dojrzałym i nie można zwiększyć jego dojrzałości przez sztuczne odparowanie nadmiaru wody z miodu odwirowanego [5].

Niezwykle zróżnicowany skład chemiczny miodu zależy przede wszystkim od rodzaju i gatunku rośliny, z której pszczoły zbierają nektar lub spadź (tzw. botaniczne pochodzenie miodu). Różnice w tym składzie dotyczą głównie odmiennych typów miodu, ale zmienność obserwuje się także dla miodów w obrębie jednego typu [6].

Miód ma szerokie zastosowanie w przemyśle spożywczym (cukiernictwo, piekarstwo) oraz fermentacyjnym, m.in. do wyrobu miodów pitnych, cukierków miodowych, win miodowych, krupników oraz napojów bezalkoholowych. Niewielkie ilości są używane do produkcji kosmetyków i niektórych preparatów farmaceutycznych [7].

2. Cel pracy

Miód bez wątpienia należy do produktów, które spożywamy ze względu na jego właściwości odżywcze, a także działanie prozdrowotne, stosowany jest w zapobieganiu i wspomagająco w terapii wielu chorób. Miód pszczeli pojawiający się w sprzedaży detalicznej powinien spełniać odpowiednie wymagania jakościowe. Bardzo duży wpływ na jakość miodu mają baza pożytkowa pasieki oraz sam pszczelarz. Zobowiązany on jest do odpowiedniej opieki nad pszczołami i świadomego zarządzania pasieką (dokonywania selekcji matek czy tworzenia nowych, zdrowych rodzin pszczelich).

Celem pracy była ocena właściwości fizykochemicznych trzech miodów pszczelich.

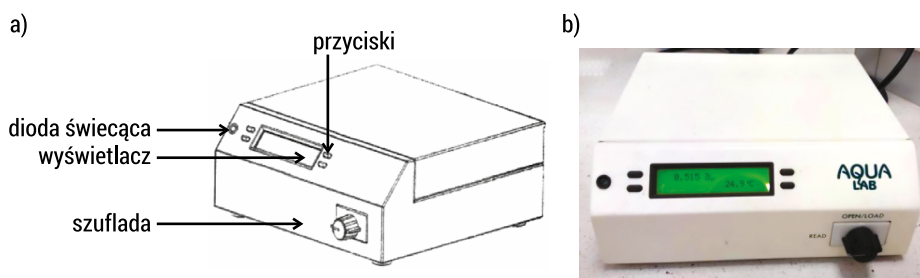
3. Materiał i metodyka badawcza

Przedmiotem badań były dwa rodzaje miodów znajdujących się w sprzedaży detalicznej w województwie podlaskim oraz jeden miód pochodzący z własnej pasieki autora korespondencyjnego pracy:

- miód 1 – pochodzący z własnej pasieki,
- miód 2 – mieszanka miodów pochodzących z UE,
- miód 3 – zakupiony od właściciela pasieki na Podlasiu.

Ocenę jakości miodów przeprowadzono zgodnie z metodyką opisaną w normie PN-88 A-77626 [8], wykorzystano następujące parametry: zawartość wody, 5-hydroksymetylofurfuralu (HMF), proliny, kwasowość ogólna, liczba diastazowa i przewodność właściwa oraz analiza pyłkowa.

Dodatkowo zbadano aktywność wody przy użyciu aparatu AQUA LAB (rys. 1). Jest to parametr charakteryzujący siłę wiązania wody w produktach. Aktywność wody to stosunek prężności pary wodnej nad produktem do prężności pary wodnej nad czystą wodą, przyjmuje wartość w zakresie od 0 do 1. Oznaczono też pH wodnych roztworów miodów metodą potencjometryczną z użyciem pH-metru.



RYS. 1. Aparat AQUA LAB: a) schemat aparatu, b) widok aparatu

ŹRÓDŁO: opracowanie własne.

Każde z oznaczeń wykonano w trzech powtórzeniach, a za wynik końcowy przyjęto wartości średniej arytmetycznej z uzyskanych wyników.

4. Wyniki i dyskusja

Na rys. 2 przedstawiono badane miody. Różnią się one konsystencją, barwą, smakiem i zapachem. Miód 1 charakteryzował się jasnobrązową barwą, był lekko skrzystalizowany (konsystencja średnioziarnista). Miód 2 to gęsta ciecz koloru herbacianego. Z racji tego, że oba miody były wielokwiatowe, odznaczały się kwiatowym i intensywnym zapachem (w przypadku miodu 1 zapach był bardzo mocny i charakteryzował

się słodkim, ostrym smakiem). Miód 3 wyróżniał się jasnożółtą barwą i kremową, półpłynną konsystencją, zapach intensywny, zbliżony do zapachu kwiatów rzepaku, o lekko słodkim smaku.

a)



b)



c)



d)



RYS. 2. Badane miody: a) miody w opakowaniach b) miód 1 – pochodzący z własnej pasieki, c) miód 2 – mieszanka miodów pochodzących z UE, d) miód 3 – zakupiony od właściciela pasieki na Podlasiu

ŹRÓDŁO: fotografie własne.

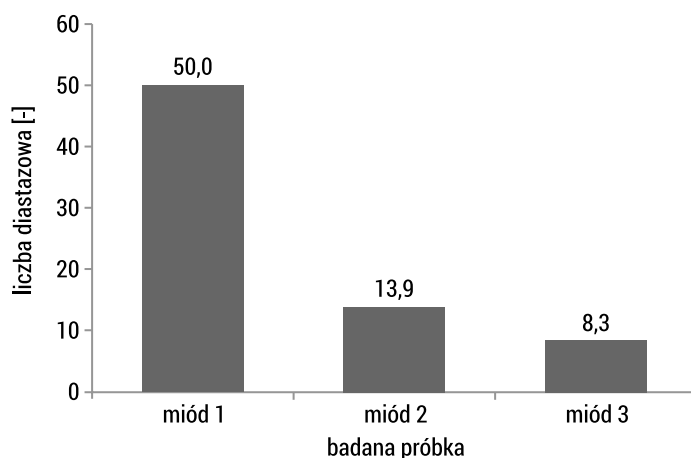
W tabeli 1 przedstawiono wyniki badań zawartości wody (wraz ze współczynnikiem załamania światła) i jej aktywności w miodach. Parametr opisuje wiązanie cząsteczek wody z cząsteczkami substancji rozpuszczonej. Intensywność wzrostu aktywności wody jest uzależniona od odmiany miodu, a także od udziału glukozy i fruktozy. Najwyższą zawartość i aktywność wody miał miód 3, a najmniejszą miód 1 pochodzący z własnej pasieki. Miód 1 miał o ok. 4% mniejszą zawartość wody i o 0,051 mniejszą aktywność wody w odniesieniu do miodu 3. Miód 2 wykazał niższą o 2,8% zawartość wody i o 0,013 niższą aktywność wody w porównaniu z miodem 3.

TABELA 1. Procentowa zawartość wody w miodzie w zależności od współczynnika załamania światła (n_D^{20}) oraz aktywności wody

Oznaczenie próbki	n_D^{20}	Zawartość wody [%]	Aktywność wody
Miód 1	1,5002	14,600	0,565
Miód 2	1,4968	15,900	0,603
Miód 3	1,4897	18,700	0,616

ŹRÓDŁO: opracowanie własne.

W oznaczeniu liczby diastazowej (rys. 3) próbka 1 znacznie wyróżnia się spośród badanych miodów. Wykazuje najwyższą liczbę diastazową, co świadczy o największej aktywności enzymów w miodzie. Najniższą aktywnością enzymatyczną wykazał się miód 3 (8,3). Niska wartość liczby diastazowej może wskazywać na wadliwe przechowywanie lub przegrzanie miodu. Może także oznaczać zafałszowanie miodu cukrem inwertowanym [8].



RYS. 3. Liczba diastazowa (zawartość enzymów) w badanych miodach

ŹRÓDŁO: opracowanie własne.

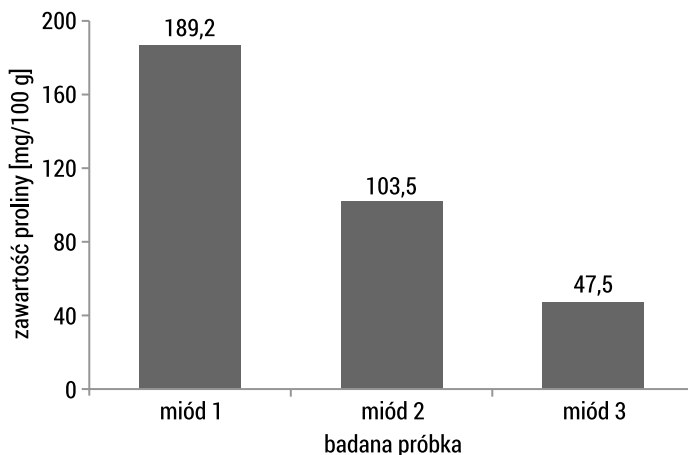
W tabeli 2 przedstawiono wyniki badań kwasowości ogólnej, odczynu (pH) i przewodności właściwej elektrolitycznej badanych miodów. Odczyn miodu zależy głównie od rodzaju surowca, sezonu, w jakim został wytworzony, i od stopnia jego dojrzałości [10]. Odczyn wszystkich badanych próbek był kwaśny i mieścił się w zakresie od 4,19 (miód 1) do 4,28 (miód 3). Natomiast najwyższym stopniem kwasowości wykazał się miód 2 (2,40°), a najmniejszym miód 3 (1,86°). Najwyższą przewodnością elektrolityczną charakteryzował się miód 1 (3,73 mS/cm). Świadczy to o wyższej zawartości związków mineralnych w roztworze wodnym miodu. Wartość poniżej 0,1-mS/cm może oznaczać zafałszowanie miodu cukrem inwertowanym [11].

TABELA 2. Wyniki badań stopnia kwasowości ogólnej, odczynu (pH) i przewodności właściwej elektrolitycznej badanych miodów

Oznaczenie próbki	Stopień kwasowości [°]	pH	Przewodność właściwa [mS/cm]
Miód 1	2,13	4,19	3,73
Miód 2	2,40	4,22	1,29
Miód 3	1,86	4,28	0,63

ŹRÓDŁO: opracowanie własne.

Ważnym parametrem określającym jakość miodu jest prolina. Duża zawartość tego aminokwasu świadczy o dojrzałości miodu. Zawartość proliny w badanych miodach wahała się od 47,5 mg/100 g do 189,2 mg/100 g (rys. 4). Najwyższą zawartością tego aminokwasu charakteryzował się miód 1, a najniższą miód 3. Zawartość wolnych aminokwasów w 100 g miodów nektarowych wynosi od 37 mg do 875 mg (śr. 175 mg), a w spadziowych – od 54 mg do 269 mg/100 g (śr. 178 mg/100 g). Należy pamiętać, że prolina to specyficzny aminokwas występujący w ilościach przynajmniej 10-krotnie wyższych niż inne aminokwasy w miodach. Według PN-88/A-77626 [8] w 100 g naturalnego miodu pszczelego nie powinno być mniej niż 25 mg proliny (niezależnie od typu miodu). Jej zawartość w miodach pszczelich służy do oceny stopnia zafałszowania miodu zinwertowaną sacharozą. Niska ilość proliny może wskazywać, że miód podczas zbioru nie był w pełni dojrzały [12].

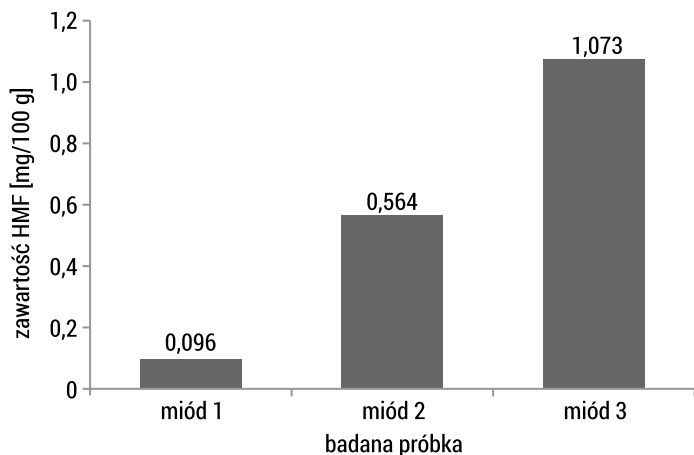


RYS. 4. Zawartość proliny w badanych miodach

ŹRÓDŁO: opracowanie własne.

HMF, czyli 5-hydroksymetylofurfural, to organiczny związek (aktywny aldehyd) tworzący się przez odłączenie z glukozy trzech cząsteczek wody. Na wzrost zawartości HMF w miodach mają wpływ: czas i warunki przechowywania (temperatura), źle przeprowadzona dekrystalizacja, przegrzanie miodu oraz rodzaj pożytków pszczelich.

HMF powstaje również podczas produkcji miodu sztucznego, w trakcie inwersji sacharozy do cukrów prostych [13]. W przypadku badanych miodów najwyższą zawartością 5-hydroksymetylofurfuralu charakteryzował się miód 3 (1,073 mg/100 g), a najniższą miód 1 (0,096 mg/100 g).



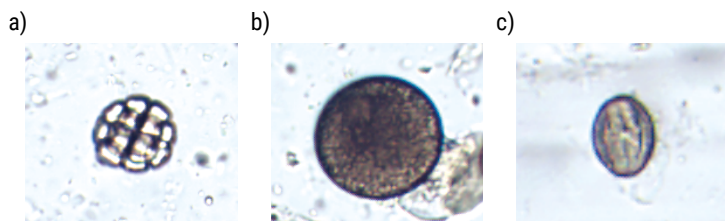
RYS. 5. Zawartość HMF w badanych miodach

ŹRÓDŁO: opracowanie własne.

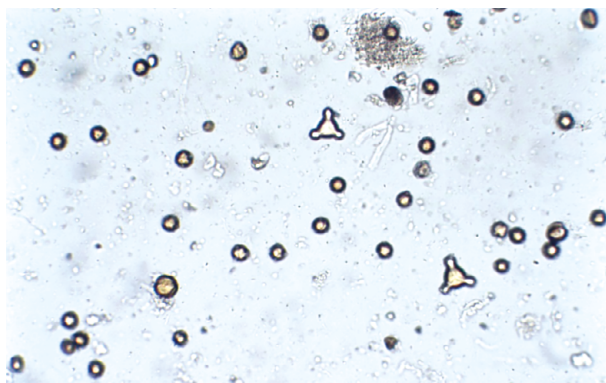
Analiza pyłkowa pozwoliła na poznanie botanicznego pochodzenia miodów i w zależności od procentu pyłku przewodniego uznanie ich za odmianowy lub wielokwiatowy oraz określenie ich geograficznego pochodzenia, a więc wykrycie ewentualnych zafałszowań. Dzięki analizie pyłkowej możliwe było szczegółowe wskazanie rodzaju badanych miodów. Próbkę miodu 1 i 2 zostały zidentyfikowane jako miody wielokwiatowe, natomiast miód 3 jako rzepakowy (rys. 6–8) [8, 14].



RYS. 6. Pyłki zidentyfikowane w miodzie 1: a) ostrożnik polny, b) akacja, c) lipa



RYS. 7. Pyłki zidentyfikowane w miodzie 2: a) akacja, b) cytrus, c) gryka



RYS. 8. Zidentyfikowane pyłki rzepaku, w przeważającej ilości, w miodzie 3

5. Wnioski

Na podstawie przeprowadzonych badań sformułowano następujące wnioski:

1. Zawartość wody w badanych próbkach miodów mieści się w granicach podawanych przez ustawodawcę w tym zakresie, który dopuszcza maksymalną zawartość do 20%.
2. Najmniejszą aktywnością wody charakteryzował się miód 1 (0,5653). Aktywność pozostałych dwóch miodów była niewiele większa i nieznacznie różniła się od siebie. Różnica mogła być spowodowana inną odmianą miodu lub innym sposobem pozyskiwania miodu przez pszczelarza (ze względu na duży wpływ zawartości wody w miodzie na aktywność wody).
3. Przewodność elektryczna w próbkach 1 i 2 mieściła się w normie dla miodów nektarowych (0,1–0,8 mS/cm). Wartość poniżej 0,1 mS/cm uzyskana w próbce 3 może świadczyć o jej zafałszowaniu lub zbyt intensywnym dokarmianiu pszczół cukrem inwertowanym w okresie zimowym.
4. Zawartość proliny w badanych miodach mieściła się w przedziale od 47,5 mg/100 g do 189,2 mg/100 g, co świadczy o dojrzałości miodu.
5. Niska liczba diastazowa oznaczona w miodach 2 i 3 mówi o mniejszej aktywności enzymów. Prawdopodobnie rekrytalizacja miodów została przeprowadzona nieprawidłowo. Wartość LD decyduje o właściwościach prozdrowotnych i odżywczych miodu. Może również wskazywać na pozostałości w plastrach zapasów zimowych, które pszczoły zgromadziły przy przetwarzaniu roztworu cukru podanego im przez pszczelarza w zamian za odebrany miód.
6. Zawartość 5-hydroksymetylofurfuralu w badanych miodach zawierała się w przedziale od 0,096 mg/100 g (miód 1) do 1,073 mg/100 g (miód 3). Duża zawartość HMF w miodzie 3 mogła być spowodowana nieprawidłowym przechowywaniem oraz przegrzaniem produktu podczas dekrystalizacji przed konfekcjonowaniem miodu.

7. Analiza pyłkowa pozwoliła określić typy badanych miodów oraz umożliwiła identyfikację zawartych w nich pyłków. Dzięki temu można określić pożytek, z jakiego korzystały pszczoły, a także procentowy udział poszczególnych gatunków roślin. Analiza jest również wykorzystywana do identyfikacji miodów, które są mieszanką miodów polskich i pochodzących z krajów UE lub z innych państw, a nawet kontynentów.

LITERATURA:

- [1] Sykut B., Kowalik K., Hus W., *Badanie jakości i zafalszowań miodów naturalnych*, „Postępy Techniki Przetwórstwa Spożywczego” 2018, nr 1, s. 60–64.
- [2] Piekut J., Borawska M.H., *Smakoloty prosto z ula. Dla zdrowia i urody*, Wydawnictwo Lekarskie PZWL, Warszawa 2004.
- [3] Szwedziak K., Smolke Z., Polańczyk E., Szopa A., Koronczok J., *Metody oceny jakości miodu*, „Postępy Techniki Przetwórstwa Spożywczego” 2017, nr 1, s. 36–38.
- [4] Miastkowski K., Bakier S., *Badania wpływu aktywności wodnej miodów na proces ich odwadniania*, „Postępy Techniki Przetwórstwa Spożywczego” 2018, nr 2, s. 49–53.
- [5] Rozporządzenie Ministra Rolnictwa i Rozwoju Wsi z dnia 18 lutego 2004 r. zmieniające rozporządzenie w sprawie szczegółowych wymagań w zakresie jakości handlowej miodu (Dz.U. 2004 nr 40 poz. 370).
- [6] Jasińska B., Tomaka K., Uram-Dudek A., Paradowska K., *Fizykochemiczna analiza miodów z rejonu Podkarpacia*, „Postępy Fitoterapii” 2020, nr 4, s. 219–227.
- [7] Gałuszka H., *Miód pszczeli – powstawanie, wartość odżywcza, zastosowanie*, Sądecki Bartnik, Nowy Sącz 1998.
- [8] Polska Norma, *Miód pszczeli*, PN-88/A-77626.
- [9] Dyrektywa Rady 2001/110/WE z dnia 20 grudnia 2001 r., popularnie zwana dyrektywą miodową (Dz.U. WE L 10 z 12 stycznia 2002).
- [10] Popek S., *Badanie kwasowości pszczelich miodów odmianowych*, Akademia Ekonomiczna w Krakowie, Kraków 2003.
- [11] Ślósarz J., *Parametry jakościowe miodu*, <https://wzp-krakow.pl/poradnik/id/57.html> [dostęp: 28.12.2023].
- [12] Kursa K., *Zawartość proliny jako wskaźnik autentyczności miodów*, „Zeszyty Naukowe Akademii Morskiej w Gdyni” 2015, nr 88, <https://sj.umg.edu.pl/sites/default/files/ZN346.pdf> [dostęp: 28.12.2023].
- [13] Grabowski M., Jabłońska K., *Pomiar stężenia HMF w miodach z polskich pasiek*, „Pasieka” 2019, nr 1, <https://pasieka24.pl/index.php/pl-pl/pasieka-czasopismo-dla-pszczelarzy/171-pasieka-1-2019/1879-pomiar-stezenia-hmf-w-miodach-z-polskich-pasiek> [dostęp: 28.12.2023].
- [14] Rozporządzenie Ministra Rolnictwa i Rozwoju Wsi z dnia 29 maja 2015 r. zmieniające rozporządzenie w sprawie szczegółowych wymagań w zakresie jakości handlowej miodu (Dz.U. z 2015 r., poz. 850).
- [15] Ocena potencjału terapeutycznego koniugatów glicydyłowanych dendrymerów PAMAM generacji czwartej z lapatynibem, fulwestrantem i/lub paklitakselem w chorobach nowotworowych i pasożytniczych

Ocena potencjału terapeutycznego koniugatów glicydylowanych dendrymerów PAMAM generacji czwartej z lapatynibem, fulwestrantem i/lub paklitakselem w chorobach nowotworowych i pasożytniczych

Magdalena Twardowska, Żaneta Szymaszek, Justyna Noga,
Artur Kołodziej, Łukasz Uram
Politechnika Rzeszowska, Koło Naukowe Studentów Biotechnologii INSERT
magdalenatwardowska5@gmail.com

Summary: Glycidylated PAMAM G4 dendrimers, due to their low toxicity, can be drug carriers in anticancer therapy. Fulvestrant, lapatinib, and paclitaxel were attached to glycidylated fourth-generation PAMAM dendrimer, and their antitumor activity was tested on glioma U-118 MG and non-small cell lung cancer A549 cells compared to human non-tumor immortalized keratinocytes. All cell lines used in the study possessed estrogen receptor (ER) and epidermal growth factor receptor (EGFR), therefore they were an excellent therapeutic goal for obtained constructs. Additionally, the synthesized conjugates were tested for antinematode therapy.

Keywords: paclitaxel, fulvestrant, lapatinib, U-118 MG glioma, A549 NSCLC, PAMAM G4 dendrimers

1. Wstęp

Nowotwory są obecnie poważnym problemem i według statystyk Amerykańskiego Towarzystwa do Walki z Rakiem z 2023 r. rak płuć będzie najczęściej diagnozowanym i najbardziej śmiertelnym nowotworem w USA [1]. Około 68,4% pacjentów z rakiem płuć w I stadium przeżyje pięć lat, natomiast w stadium IVB tylko około 5,8%. Standardowe leczenie stadiów I–IIIA obejmuje resekcję chirurgiczną, a następnie leczenie systemowe [2]. Mimo to odsetek przerzutów jest często wysoki [3]. Rzadziej występującym, ale charakteryzującym się wyższą śmiertelnością nowotworem jest glejak wielopostaciowy (GBM, ang. *glioblastoma multiforme*). Jest to bardzo agresywny

gwiazdzia IV stopnia [4]. Obecnie jedynym powszechnie dostępnym chemioterapeutyką stosowaną w jego terapii jest temozolomid, którego skuteczność jest niewielka i dodatkowo powoduje negatywne skutki uboczne [5]. Istotnym wyzwaniem pozostaje więc opracowanie nowych terapii i leków przeciwko tym nowotworom. Podejrzewa się, że występowanie glejaka może być związane z poziomem hormonów płciowych, głównie 17- β -estradiolu [6]. Estrogen działa na komórki przez receptory estrogenowe (ER, ang. *estrogen receptors*). Stwierdzono, że sygnalizacja ER α jest powiązana z progresją glejaka, natomiast ER β mają działanie przeciwnowotworowe [7]. Inne badania wykazały, że estrogen, oddziałując z receptorem E2, może stymulować proliferację, oporność na apoptozę, angiogenezę, migrację i przerzuty komórek raka płuc [8]. Niedrobnokomórkowy rak płuc (NSCLC, ang. *non-small cell lung cancer*) jest nowotworem wykazującym nadekspresję receptorów ER – jego komórki mają nie tylko ER α , lecz także ER β [9]. Dlatego zasadne wydaje się zbadanie skuteczności inhibitorów ER w terapii zarówno GBM, jak i NSCLC. Jednym z kandydatów na potencjalny lek przeciwnowotworowy jest fulwestrant, powszechnie stosowany w leczeniu nowotworów piersi wykazujących obecność receptorów ER. Blokując on receptor ER po związaniu z nim i powodując jego degradację, a w konsekwencji hamując sygnalizację estrogenową [10]. Zmniejsza także cechy mezenchymalne komórek raka płuc i uwrażliwia komórki na chemioterapię [11].

Innym czynnikiem specyficznym dla wielu rodzajów nowotworów, w tym GBM i NSCLC, jest obecność receptora naskórkowego czynnika wzrostu (EGFR, ang. *epidermal growth factor receptor*) [12–14]. Kaskada sygnalizacyjna EGFR jest kluczowym elementem regulacji proliferacji komórek, apoptozy, przerzutów, angiogenezy, różnicowania, podziału, przeżycia i rozwoju raka [15, 16]. W terapii nowotworów z nadekspresją EGFR zaleca się w pierwszej kolejności stosowanie leków anty-EGFR [16], gdyż aktywność EGFR można kontrolować poprzez wiązanie się czynników inhibitorowych z domeną kinazy tyrozynowej [17]. Lapatynib jest odwracalnym inhibitorem EGFR typu 1 (HER1, ang. *human epidermal growth factor receptor 1*) i typu 2 (HER2, ang. *human epidermal growth factor receptor 2*), podawanym doustnie i zatwierdzonym do leczenia raka piersi z nadekspresją HER2 w skojarzeniu z kapecytabiną [18]. Lapatynib nasila fluorescencję protoporfiryny IX za pośrednictwem kwasu 5-aminolewulinowego i odpowiedź na terapię fotodynamiczną w liniach komórkowych ludzkiego glejaka [19], a stosowanie go w wysokich dawkach do standardowego leczenia nowo zdiagnozowanego GBM było w dużej mierze dobrze tolerowane i bezpieczne dla pacjentów [20]. Kolejnym lekiem stosowanym w leczeniu NSCLC jest paklitaksel, który ułatwia polimeryzację mikrotubul i zaburza funkcje komórkowe, zwłaszcza ich prawidłowy podział, indukując apoptozę [21]. Paklitaksel jest też potencjalnym kandydatem do terapii przeciwo-glejaka, gdyż jego IC₅₀ jest *in vitro* 1400 razy niższy niż najczęściej stosowanego temozolomidu. Niestety zastosowanie kliniczne paklitakselu jest ograniczone ze względu na obecność glikoproteiny P w błonie komórkowej NSCLC i bariery krew-mózg (BBB, ang. *blood brain barrier*) [21]. Jednym z możliwych podejść mającym na celu stworzenie terapii skojarzonej oraz wzmocnienie działania

wymienionych terapeutyków jest zastosowanie nośnika takiego jak dendrymery poliamidoaminowe PAMAM (ang. *poly(amidoamine) dendrimers*), które mogą dostarczać paklitaksel, fulwestrant i lapatynib przez BBB.

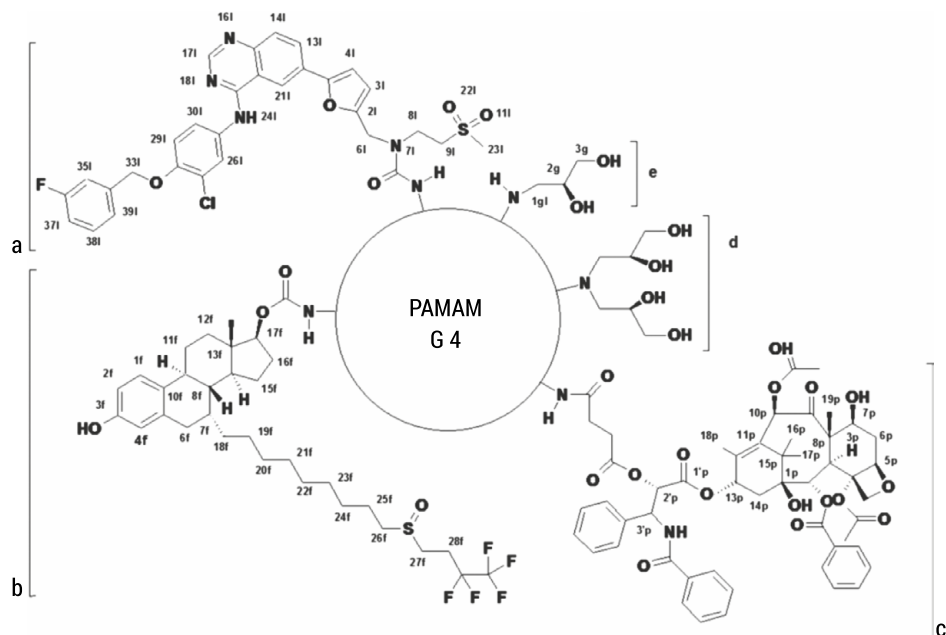
Dendrymery poliamidoaminowe (PAMAM) to symetryczne, hiperrozgałęzione polimerowe makrocząsteczki o dobrze zdefiniowanej kulistej strukturze o wielkości nanometrycznej. Pozwalają na przyłączenie odpowiednich ligandów służących do celowania, obrazowania i terapii raka. Ponadto zwiększają rozpuszczalność i biodostępność dostarczanych leków. Zdolność PAMAM do interakcji z białkami osocza umożliwia pasywne celowanie poprzez zwiększoną przepuszczalność i efekt retencji [22]. Aby obniżyć toksyczność dendrymerów PAMAM i zwiększyć ich przepuszczalność, powierzchniowe grupy aminowe mogą być hydroksylowane PEG (ang. *polyethylene glycol*) lub glicydołem [23, 24].

W opisywanych badaniach wykorzystano wysoce biokompatybilne, glicydyłowane dendrymery PAMAM czwartej generacji (G4) jako nośnik dla paklitakselu (P), fulwestrantu (F) i/lub lapatynibu (L). Zsyntezowano cztery koniugaty PAMAM: G4P, G4F, G4L i G4PFL i badano skuteczność niszczenia przez nie ER-pozytywnych i EGFR-pozytywnych komórek raka płuc linii A549, glejaka U-118 MG i uniesmiertelnionych nienowotworowych ludzkich keratynocytów (HaCaT, ang. *human keratinocyte cell line*). Postawiono hipotezę, że badane leki skoniugowane z dendrymerami PAMAM mogą wywierać silniejszy efekt terapeutyczny niż same leki. Dodatkowo w przypadku G4PFL spodziewano się efektu addytywnego, a nawet synergicznego. Potencjalne leki przeciwnowotworowe wymagają też charakterystyki toksyczności i mutagenności *in vivo*, dlatego przeprowadzono badania na nicieniu *Caenorhabditis elegans*, będącym bardzo atrakcyjnym modelem zwierzęcym do charakteryzowania właściwości terapeutyków przeciwnowotworowych. Niewielki rozmiar, łatwość hodowli i możliwość modyfikacji genetycznej *C. elegans* zapewniają wyrafinowaną platformę *in vivo*, która łączy techniczne zalety mikroorganizmu z większą złożonością biologiczną organizmu wielokomórkowego [25, 26].

2. Synteza i charakterystyka koniugatów PAMAM G4 z paklitakselem, fulwestrantem i/lub lapatynibem

Koniugaty trzech leków przeciwnowotworowych: paklitakselu (P), fulwestrantu (F) oraz lapatynibu (L) uzyskano przez przyłączenie sfunkcjonalizowanych leków wiązaniami amidowymi do pierwszorzędowych grup aminowych dendrymeru PAMAM G4 (rys. 1).

Dokładne ścieżki syntezy dendrymerów i ich charakterystykę przy użyciu metody jądrowego rezonansu magnetycznego NMR opisano w publikacji [27]. Charakterystykę otrzymanych konstruktów dendrymerowych przedstawiono w tabeli 1.



RYS. 1. Schemat koniugatów dendrymeru PAMAM G4 z paklitakselem (c), fulwestrantem (b) i/lub lapatynibem (a) opłaszczony R-glicydołem (d, e). G4P–(G4*^{4P109gl}), G4F–(G4*^{13L85gl}), G4L–(G4*^{13L85gl}), G4PF–(G4*^{4P10F98gl}), G4PL–(G4*^{4P10L98gl}) i G4PFL–(G4*^{4P11F11P74gl}). Symbol * oznacza znakowanie resztą FITC

ŹRÓDŁO: [27].

TABELA 1. Porównanie właściwości koniugatów dendrymeru PAMAM G4 z lapatynibem (L), fulwestrantem (F) i/lub paklitakselem (P), opłaszczonych glicydołem (gl)

Koniugat	MW [kDa]	Rozmiar (SD) [nm]	Wskaźnik polidispersyjności PDI (SD)	Z (SD) [mV]
G4* ^{126gl}	19,1	5,12 (0,25)	0,080 (0,002)	4,35 (0,28)
G4* ^{4P109gl}	26,4	99,20 (7,28)	0,134 (0,016)	13,57 (0,43)
G4* ^{13F64gl}	27,6	138,23 (6,24)	0,155 (0,022)	38,02 (0,54)
G4* ^{13L85gl}	28,8	113,13 (4,64)	0,112 (0,014)	40,29 (0,74)
G4* ^{4P10L98gl}	31,7	95,20 (4,46)	0,125 (0,010)	19,92 (0,53)
G4* ^{4P10F98gl}	32,0	113,41 (5,48)	0,128 (0,015)	29,29 (0,72)
G4* ^{4P11F11L74gl}	37,5	105,47 (5,39)	0,159 (0,018)	34,33 (0,65)

Roztwory w dmso-d₆. Gwiazdkami oznaczono liczbę reszt FITC przyłączonych przez wiązanie tiomocznikowe. Rozmiar i potencjał zeta zostały wyznaczone metodą DLS. SD – odchylenia standardowe.

ŹRÓDŁO: opracowanie własne.

3. Cytotoksyczność dendrymerów

W badaniach wykorzystano trzy linie komórkowe jako cel terapeutyczny dla glicydylowanych koniugatów PAMAM G4 z paklitakselem, fulwestrantem i/lub lapatynibem: komórki glejaka U-118 MG IV stopnia złośliwości, komórki niedrobnokomórkowego raka płuc A549 i porównawczo unieśmiertelnione ludzkie keratynocyty HaCaT. Hodowlę wszystkich typów komórek prowadzono w medium DMEM (*Dulbecco's Modified Eagle's Media*) z dodatkiem 10-procentowej inaktywowanej termicznie bydlęcej surowicy FBS (ang. *Fetal bovine serum*), penicyliny (100 U/ml) i 1-procentowego roztworu streptomycyny. Komórki hodowano w kontrolowanych warunkach (temperatura 37°C, 5% CO₂, 95% wilgotność). Media hodowlane wymieniano co 2–3 dni. Komórki pasażowano przy 70–85% konfluencji z użyciem 0,25% trypsyny – 0,03% EDTA w PBS-ie, bez jonów wapnia i magnezu. Morfologię komórek sprawdzono pod mikroskopem odwróconym Nikon TE2000S z kontrastem fazowym (Tokio, Japonia). Liczbę i żywotność komórek szacowano za pomocą automatycznego licznika komórek TC20 (BioRad Laboratories, Hercules, Kalifornia, USA) przy użyciu testu wykluczenia błękitu trypanu. Roztwory robocze zsintetyzowanych koniugatów dendrymerów i samych leków przygotowano w mediach hodowlanych, w których stężenie DMSO nie przekraczało 0,1% (nie wpływało na badane komórki).

Komórki A549 oraz HaCaT wykazują ekspresję receptorów estrogenowych (ER α i ER β) [28, 29]. Brak jest danych na temat ekspresji ER w komórkach glejaka U-118 MG, jednakże w komórkach glejaka U-138 MG, który jest cytogenetycznie do niego bardzo podobny, zidentyfikowano ekspresję ER [30]. Jednocześnie komórki glejaka U-118 MG wykazują ekspresję HER2 oraz EGFR [31]. Z tego powodu właśnie te linie komórkowe były odpowiednimi modelami komórek do przeprowadzenia badań.

Toksyczność leków i konstruktów zbadano przy użyciu dwóch różnych testów – testu z czerwinią obojętną (NR, ang. *neutral red*) i testu z solami tetrazolowymi (XTT, ang. *2,3-Bis-(2-methoxy-4-nitro-5-sulfophenyl)-2H-tetrazolium-5-carboxanilide*). W tym celu wszystkie trzy linie komórkowe wysiano na 96-dółkowe płytki (1 $\times$ 10⁴ komórek/dółek) i inkubowano przez 24 godziny do osiągnięcia adhezji. Po tym czasie medium hodowlane zastąpiono pożywką zawierającą odpowiednie stężenia badanych koniugatów i inkubowano przez kolejne 48 godzin. Ponownie wymieniono media hodowlane i dodano roztwory odpowiednich reagentów – czerwieni obojętnej (w teście NR) lub soli tetrazolowych (w teście XTT). Po godzinie inkubacji zmierzono absorbancję przy 540 nm (NR) lub 450 nm (XTT) wobec 620 nm. Wartości połowy maksymalnego stężenia hamującego (IC₅₀) obliczono za pomocą kalkulatora AAT Bioquest [41].

Bardziej czuły test z wykorzystaniem czerwieni obojętnej wykazał, że spośród badanych leków najskuteczniejszy w niszczeniu komórek był paklitaksel z IC₅₀ równym odpowiednio 50,35; 55,56; 2,53 nM odpowiednio dla komórek A549, U118 MG i HaCaT (tab. 2). Fulwestrant okazał się nietoksyczny wobec żadnej z badanych linii komórkowych do stężenia 100 μ M, co zostało potwierdzone w badaniach na komórkach linii A549 [32]. Lapatynib mimo słabszego działania był skuteczny w wyższych

stężeniach – wartości współczynnika IC_{50} wynosiły odpowiednio 16,7, 14,9 i 6,2 μM dla komórek A549, U118 MG i HaCaT (tab. 2).

TABELA 2. Wartości połowy maksymalnego stężenia hamującego (IC_{50}) oznaczone po 48 h traktowania komórek A549, U-118 MG i HaCaT paklitaksem, fulwestrantem, lapatynibem i ich koniugatami z glicydylowanymi dendrymerami PAMAM G4: G4P, G4F, G4L oraz G4PFL

	Wartość IC_{50} [nM] – test NR		
	A549	U-118 MG	HaCaT
Paklitaksel	50,35	55,56	2,53
Fulwestrant	>>100,00 *	>>100 000 *	>>100 000 *
Lapatynib	16701,61	14878,63	6150,48
G4P	>>320 * >>1280 *p	25,28 101,12 p	1,63 6,52 p
G4F	>>1000 * >>130 000 * f	>>10 000 * >>130 000 * f	2927,15 38052,97 f
G4L	1324,05 17212,75 l	54 395 6527,4 l	57,87 765,31 l
G4PFL	>>400 * >>400 * p >>4400 * fl	78,70 314,80 p 865,70 fl	9,56 38,12 p 104,83 fl
Wartość IC_{50} [nM] – test XTT			
G4P	>>320 >>1280*p	3,14 12,56 p	0,99 3,96 p
G4F	>20 000 >260 000 f	6062,64 78814,32 f	1282,15 16667,95 f
G4L	3885,91 50516,83 l	1147,86 14922,12 l	76,90 999,10 l
G4PFL	>1600 >6400 p >17 600 fl	9,45 37,80 p 103,95 fl	2,00 8,00 p 22,00 fl

Legenda: p – stężenie wprowadzonego P; f – stężenie wprowadzonego F; l – stężenie wprowadzonego L. Wartości IC_{50} obliczono za pomocą kalkulatora AAT Bioquest IC_{50} [41]. Gwiazdkami oznaczono żywotność komórek, która w badanym zakresie stężeń przekraczała 50%.

ŹRÓDŁO: opracowanie własne.

Dendrymery wzmacniały działanie przyłączonych do nich leków. Przyłączenie 13 reszt F do glicydylowanego dendrymeru PAMAM G4 spowodowało niemal dwukrotne obniżenie wartości IC_{50} dla komórek HaCaT. W przypadku linii komórkowej A549 nie zaobserwowano spadku żywotności komórek poniżej 50%. Koniugat z przyłączonym paklitaksem nie powodował zmniejszenia żywotności komórek wraz ze wzrostem stężeń w komórkach HaCaT i A549. To zjawisko zostało wcześniej opisane jako typowe dla paklitakselu [33].

Koniugat zawierający lapatynib wykazywał działanie dwu- i ośmiokrotnie silniejsze wobec odpowiednio komórek glejaka i keratynocytów niż sam lapatynib (tab. 2). Zmodyfikowanie nośnika dendrymeru G4 PAMAM z wykorzystaniem czterech reszt P spowodowało około dwukrotne osłabienie efektu działania koniugatu w porównaniu z samym lekiem wobec linii komórkowych HaCaT i U-118 MG, a wobec komórek A549 wzrosło nawet 25 razy (tab. 2). W pozostałych przypadkach skuteczność koniugatów była zależna od stężenia wprowadzonych leków.

Przyjęto założenie, że wieloskładnikowy koniugat G4PFL zawierający wszystkie trzy analizowane leki wykaże addytywny lub synergiczny efekt terapeutyczny. Konstrukt G4PFL wykazywał wyższą cytotoksyczność względem badanych komórek niż koniugaty G4F i G4L, jednak mniejszą niż G4P. W związku z tym można przypuszczać, że jego skuteczność wynikała głównie z obecności reszt paklitakselu. Niższa toksyczność w porównaniu z G4P mogła być spowodowana różnicami w średnicy i właściwościach fizykochemicznych obu koniugatów (tab. 2). G4PFL charakteryzuje się dużą średnicą nanocząstek wynoszącą 105,47 nm. Makrocząsteczki G4P są mniejsze (99,20 nm) i łatwiej przenikają do komórek niż G4PFL. Największą średnicę miał koniugat G4F (138,23) z najsłabszą zdolnością wnikania do komórek. Można zatem stwierdzić, że aktywność badanych koniugatów była związana z zależną od wielkości ich cząsteczek zdolnością do kumulacji w komórce oraz od aktywności przyłączonych do nich leków.

Test NR mierzy integralność lizosomów, która jest wskaźnikiem zdrowia komórek [34]. Drugim przeprowadzonym badaniem był test wykorzystujący redukcję soli tetrazolowych (XTT), który ocenia aktywność mitochondrialnych oksydoreduktaz, stanowi zatem dobry wskaźnik stanu mitochondriów [35]. Wyniki uzyskane w teście XTT wykazały analogiczny wzorec toksyczności jak w przypadku testu NR (tab. 2).

Analizując wartości IC_{50} , można zauważyć, że koniugat z lapatynibem miał większy wpływ na stan lizosomów i błon komórkowych, natomiast koniugaty z paklitakselem i fulwestrantem powodowały głównie dysfunkcję mitochondriów (tab. 2).

4. Toksyczność wobec nicienia *C. Elegans*

Obecnie leki przeciwnowotworowe są rozważane jako potencjalne środki przeciwnowotworowe o zmienionym zastosowaniu. Stwierdzono, że flubendazol hamuje polimeryzację tubuliny, wykazuje zdolność do stymulowania procesów apoptozy, ferroptozy, autofagii, eliminacji komórek macierzystych nowotworu oraz degradacji guza [36]. Istnieje także możliwość zachodzenia odwrotnego efektu, gdzie leki przeciwnowotworowe, zwłaszcza te o łagodniejszych niepożądanych skutkach ubocznych i w niższych dawkach mogą wykazywać działanie przeciwpasożytnicze. *Caenorhabditis elegans* reaguje na hormony estrogenowe – ma receptor estrogenowy [37, 38] oraz receptory EGFR [39, 40]. Można więc podejrzewać, że koniugaty PAMAM G4 z inhibitorem receptora estrogenowego (fulwestrantem) i receptora naskórkowego czynnika wzrostu (lapatynibem) mogą potencjalnie mieć właściwości przeciwnowotworowe.

Hodowlę nicieni typu dzikiego (szcepek N2, odmiana Bristol) prowadzono w temperaturze 20°C na płytkach agarowych NGM ze szczepem *Escherichia coli* OP50 jako źródłem pożywienia. Hodowlę *C. elegans* zsynchronizowano poprzez traktowanie podchlorynem. Uzyskane jaja pozostawiono w buforze M9 w temperaturze 21°C do następnego dnia. Następnie robaki w stadium L1 umieszczono na płytkach NGM z *E. coli* OP50 i pozostawiono w temperaturze 21°C aż do osiągnięcia stadium L4 (około 44 godziny). Robaki zawieszano w pełnej pożywce S z *E. coli* OP50 (1:1000), 0,08% cholesterolu (5 mg/ml w Et-OH), 1-procentowym roztworze penicyliny-streptomycyny, 1-procentowym roztworze nystatyny i 100 mM FUDR (w stężeniu końcowym 200 µM), aby otrzymać około 20 nicieni w 50 µl. FUDR dodano w celu sterylizacji nicieni.

Po przeniesieniu nicieni na płytkę z 96 dołkami (około 20 osobników w 50 µl) dodano roztwory badanych koniugatów w kompletnej pożywce S (50 µl/dołek). Maksymalne końcowe stężenie DMSO wynosiło 0,5% i nie miało istotnego wpływu na żywotność nicieni. Dla każdego stężenia wykonano pięć powtórzeń. Płytkę inkubowano w temperaturze 21°C przez siedem dni. W tym czasie zliczano żywe i martwe robaki pod odwróconym mikroskopem (Delta Optical IB-100). Zebrano obrazy mikroskopowe przedstawiające zmiany morfologiczne powstałe pod wpływem badanych leków i przeanalizowano je w programie ImageJ 1.49v w celu oszacowania długości ciała nicieni.

Żywotność *Caenorhabditis elegans* w trakcie siedmiodniowej inkubacji z G4P, G4F, G4L i G4PFL oceniono w odstępach 24-godzinnych. Wyniki wykazały, że wszystkie użyte koniugaty były wysoce toksyczne w badanych stężeniach. Najsilniejszy efekt toksyczny występował po zastosowaniu koniugatu z wszystkimi trzema lekami ($LC_{50} = 6,75 \mu M$), najniższy zaobserwowano w przypadku G4P ($LC_{50} > 24 \mu M$) (tab. 3).

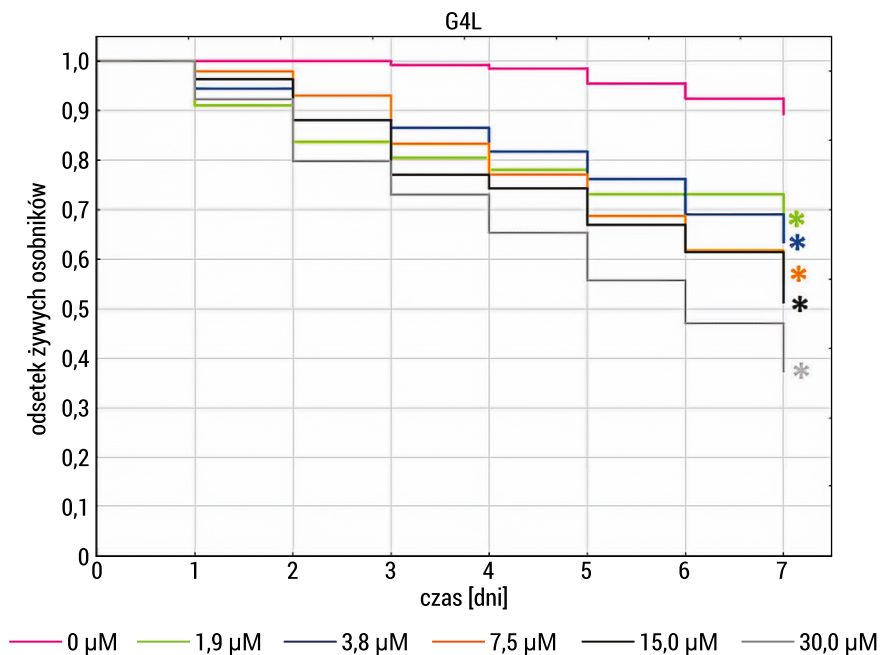
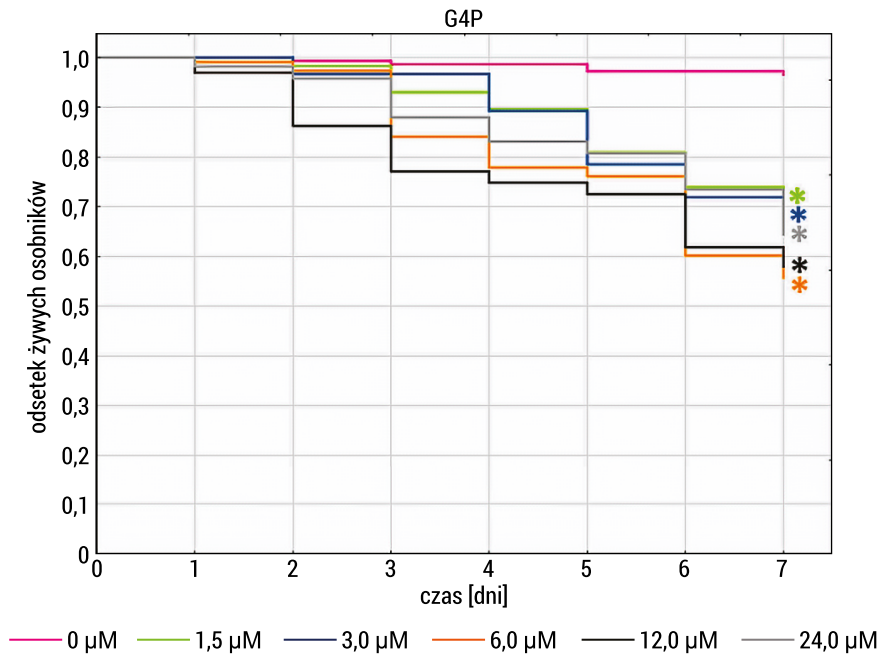
TABELA 3. Wartości stężenia letalnego (LC_{50}) określone po 7-dniowym traktowaniu *Caenorhabditis elegans* G4P, G4F, G4L i G4PFL

Związek	$LC_{50} [\mu M]$
Mebendazol	4,00
G4P	>24,00
G4F	12,50
G4L	14,80
G4PFL	6,75

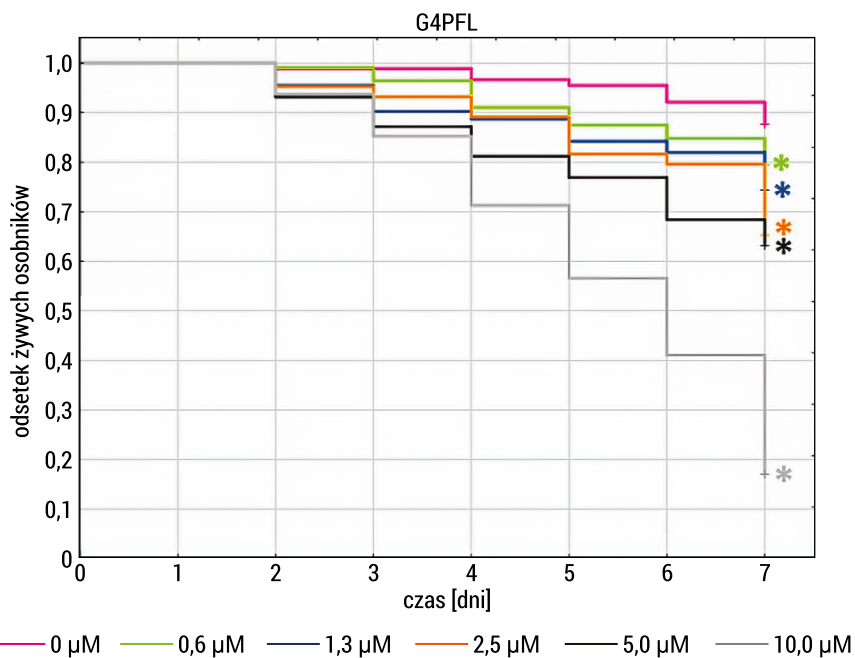
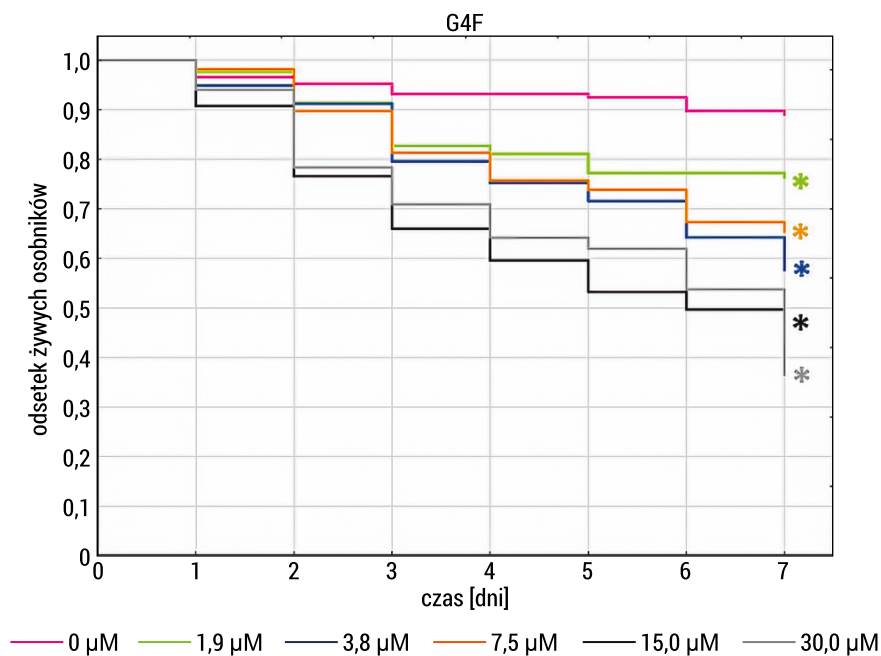
Wartości obliczono za pomocą kalkulatora LC_{50} AAT Bioquest [41].

ŹRÓDŁO: opracowanie własne.

Dla nicieni inkubowanych z koniugatem G4P zaobserwowano statystyczny spadek żywotności o ponad 40% w stężeniach 6 i 12 µM. Liczba żywych osobników nie różniła się znacząco pomiędzy badanymi stężeniami G4P, z wyjątkiem 12 i 6 µM, gdzie widać gwałtowny spadek żywotności występujący odpowiednio w drugim i trzecim dniu inkubacji (rys. 2).



RYS 2a. Krzywe Kaplana–Meiera dla *C. elegans* po 7-dniowej inkubacji z G4P, G4F, G4L, i G4PFL. Wyniki zaprezentowano jako odsetek żywych osobników. Istotnie statystyczne różnice wobec traktowanej DMSO kontroli oznaczono za pomocą testu Gehana Wilcoxona i oznaczono symbolem *



RYS 2B. Krzywe Kaplana–Meiera dla *C. elegans* po 7-dniowej inkubacji z G4P, G4F, G4L, i G4PFL. Wyniki zaprezentowano jako odsetek żywych osobników. Istotnie statystyczne różnice wobec traktowanej DMSO kontroli oznaczono za pomocą testu Gehana Wilcoxa i oznaczono symbolem *

ŹRÓDŁO: opracowanie własne.

G4F i G4L powodowały większy spadek żywotności *C. elegans* przy LC_{50} wynoszącym odpowiednio 12,50 i 14,80 μM . Najbardziej toksyczne stężenie koniugatu z fulwestrantem w ciągu pierwszych sześciu dni obserwacji wynosiło 15 μM . Sytuacja zmieniła się w siódmym dniu inkubacji, gdy w stężeniu 30 μM G4F wzrosła śmiertelność. Koniugat G4L powodował obniżenie żywotności nicieni wraz ze wzrostem stężenia leku. Najwyższe stężenie leku w wysokości 30 μM spowodowało spadek żywotności do 37,5%. G4PFL był najbardziej toksycznym koniugatem ($LC_{50} = 6,75 \mu M$), a jego toksyczność była tylko nieznacznie słabsza niż w przypadku popularnego leku przeciwpasożytniczego, mebendazolu ($LC_{50} = 4,0 \mu M$). Najwyższe (10 μM) stężenie koniugatu zawierającego wszystkie trzy badane leki spowodowało obniżenie żywotności *C. elegans* o ponad 80% (rys. 2). Można zatem zaobserwować addytywny efekt leków dołączonych do koniugatu G4PFL.

Podczas inkubacji *C. elegans* z badanymi konstruktami obserwowano zmiany morfologiczne i behawioralne we wszystkich zastosowanych koniugatach. Najbardziej zauważalne zmiany występowały w grupie leczonej G4P, a najsubtelniejsze w tej z G4F. Najczęściej obserwowano degradację i deformację narządów wewnętrznych, a także wpływ na ruchliwość nicieni (niekontrolowane ruchy przypominające drgawki). W grupie traktowanej G4P degradacja zachodziła głównie od strony głowy i pierścienia nerwowego, podczas gdy G4F powodował degradację części od strony ogona. G4L w stężeniach 7,5 μM i 30 μM wywoływał deformację naskórka i narządów wewnętrznych, z widocznymi zmianami na całym ciele nicieni. Dodatkowo wydawało się, że ciało nicienia kurczy się wewnątrz kutikuli, zaobserwowano też proces linienia, który jest nieobecny w tym stadium rozwojowym.

5. Podsumowanie

Otrzymane koniugaty skutecznie przenikały do badanych komórek. Mogą stanowić użyteczne narzędzie w terapii nie tylko glejaka, lecz także raka płuc, którego komórki mają zdolność przerzutowania do centralnego układu nerwowego. Aktywność badanych koniugatów G4P, G4L i G4PFL była wysoka w niskich, nano- i mikromolowych stężeniach. Niestety związki te niszczyły również komórki prawidłowe z receptorami ER lub EGFR. Badane dendrymery charakteryzowały się zróżnicowaną toksycznością, przy czym dla organizmu wielokomórkowego można było zaobserwować addytywny efekt działania leków dołączonych do G4PFL. Należałoby wykonać dodatkowe badania, które umożliwiłyby dokładniejszą analizę mechanizmu toksyczności tego konstruktu. Najbardziej obiecujący w terapii przeciwnowotworowej wydaje się koniugat G4L, wykazujący 2–8 razy wyższą toksyczność wobec komórek gliomy i HaCaT niż analogiczne stężenie samego lapatynibu. Koniugat G4PFL może być rozważany jako doskonały kandydat w terapii przeciwnicieniowej i przeciwrakowej dzięki zbliżonym właściwościom do mebendazolu będącego popularnym lekiem przeciwnicieniowym.

Literatura

- [1] *Cancer Facts & Figures 2023*, <https://www.cancer.org/research/cancer-facts-statistics/all-cancer-facts-figures/2023-cancer-facts-figures.html> [dostęp: 29.01.2024].
- [2] Pisters K.M.W. et al., *Cancer Care Ontario and American Society of Clinical Oncology Adjuvant Chemotherapy and Adjuvant Radiation Therapy for Stages I-IIIa Resectable Non Small-Cell Lung Cancer Guideline*, „Journal of Clinical Oncology” 2007, nr 25, s. 5506–5518, <https://doi.org/10.1200/JCO.2007.14.1226>.
- [3] Pignon J.P. et al., *Lung adjuvant cisplatin evaluation: a pooled analysis by the LACE Collaborative Group*, „Journal of Clinical Oncology” 2008, nr 26, s. 3552–3559, <https://doi.org/10.1200/JCO.2007.13.9030>.
- [4] Stupp R., Tonn J.C., Brada M., Pentheroudakis G., *High-grade malignant glioma: ESMO Clinical Practice Guidelines for diagnosis, treatment and follow-up*, „Annals of Oncology” 2010, nr 21, s. v190–v193, <https://doi.org/10.1093/annonc/mdq187>.
- [5] Lee S.Y., *Temozolomide resistance in glioblastoma multiforme*, „Genes & Diseases” 2016, nr 3, s. 198–210, <https://doi.org/10.1016/j.gendis.2016.04.007>.
- [6] Bello-Alvarez C., Camacho-Arroyo I., *Impact of sex in the prevalence and progression of glioblastomas: the role of gonadal steroid hormones*, „Biology of Sex Differences” 2021, nr 12, 28, <https://doi.org/10.1186/s13293-021-00372-5>.
- [7] Peña-Gutiérrez K.M., Hernández-Ortega K., Bello-Alvarez C., Camacho-Arroyo I., *Expression and estrogen regulation of G protein-coupled estrogen receptor in human glioblastoma cells*, „Oncology Letters” 2022, nr 24, 397, <https://doi.org/10.3892/ol.2022.13517>.
- [8] Tam A., Morrish D., Wadsworth S., Dorscheid D., Man S.F.P., Sin D.D., *The role of female hormones on lung function in chronic lung diseases*, „BMC Womens Health” 2011, nr 11, 24, <https://doi.org/10.1186/1472-6874-11-24>.
- [9] Rodriguez-Lara V., Hernandez-Martinez J.M., Arrieta O., *Influence of estrogen in non-small cell lung cancer and its clinical implications*, „Journal of Thoracic Disease” 2018, nr 10, s. 482–497, <https://doi.org/10.21037/jtd.2017.12.61>.
- [10] Osborne C.K., Wakeling A., Nicholson R.I., *Fulvestrant: an oestrogen receptor antagonist with a novel mechanism of action*, „British Journal of Cancer” 2004, nr 90, Suppl 1, s. S2–S6, <https://doi.org/10.1038/sj.bjc.6601629>.
- [11] Hamilton D.H. et al., *Targeting Estrogen Receptor Signaling with Fulvestrant Enhances Immune and Chemotherapy-Mediated Cytotoxicity of Human Lung Cancer*, „Clinical Cancer Research” 2016, nr 22, s. 6204–6216, <https://doi.org/10.1158/1078-0432.CCR-15-3059>.
- [12] Rosell R. et al., *Screening for epidermal growth factor receptor mutations in lung cancer*, „The New England Journal of Medicine” 2009, nr 361, s. 958–967, <https://doi.org/10.1056/NEJMoa0904554>.
- [13] Xu H. et al., *Epidermal growth factor receptor in glioblastoma*, „Oncology Letters” 2017, nr 14, s. 512–516, <https://doi.org/10.3892/ol.2017.6221>.
- [14] Bethune G., Bethune D., Ridgway N., Xu Z., *Epidermal growth factor receptor (EGFR) in lung cancer: an overview and update*, „Journal of Thoracic Disease” 2010, nr 2, 48.
- [15] Sabbah D.A., Hajjo R., Sweidan K., *Review on Epidermal Growth Factor Receptor (EGFR) Structure, Signaling Pathways, Interactions, and Recent Updates of EGFR Inhibitors*, „Current Topics in Medicinal Chemistry” 2020, nr 20, s. 815–834, <https://doi.org/10.2174/1568026620666200303123102>.

- [16] Ayati A., Moghimi S., Salarinejad S., Safavi M., Pouramiri B., Foroumadi A., *A review on progression of epidermal growth factor receptor (EGFR) inhibitors as an efficient approach in cancer targeted therapy*, „Bioorganic Chemistry” 2020, nr 99, 103811, <https://doi.org/10.1016/j.bioorg.2020.103811>.
- [17] Lau S.C., Chooback N., Ho C., Melosky B., *Outcome Differences Between First- and Second-generation EGFR Inhibitors in Advanced EGFR Mutated NSCLC in a Large Population-based Cohort*, „Clinical Lung Cancer” 2019, nr 20, s. e576–e583, <https://doi.org/10.1016/j.clcc.2019.05.003>.
- [18] Tevaarwerk A.J., Kolesar J.M., *Lapatinib: a small-molecule inhibitor of epidermal growth factor receptor and human epidermal growth factor receptor-2 tyrosine kinases used in the treatment of breast cancer*, „Clinical Therapeutics” 2009, nr 31(2), s. 2332–2348, <https://doi.org/10.1016/j.clinthera.2009.11.029>.
- [19] Mansi M., Howley R., Chandratre S., Chen B., *Inhibition of ABCG2 transporter by lapatinib enhances 5-aminolevulinic acid-mediated protoporphyrin IX fluorescence and photodynamic therapy response in human glioma cell lines*, „Biochemical Pharmacology” 2022, nr 200, 115031, <https://doi.org/10.1016/j.bcp.2022.115031>.
- [20] Yu A. et al., *Report of safety of pulse dosing of lapatinib with temozolomide and radiation therapy for newly-diagnosed glioblastoma in a pilot phase II study*, „Journal of Neuro-Oncology” 2017, nr 134, s. 357–362, <https://doi.org/10.1007/s11060-017-2533-6>.
- [21] Xie X. et al., *Overcoming drug-resistant lung cancer by paclitaxel loaded tetrahedral DNA nanostructures*, „Nanoscale” 2018, nr 10, s. 5457–5465, <https://doi.org/10.1039/C7NR09692E>.
- [22] Surekha B., Kommana N.S., Dubey S.K., Kumar A.V.P., Shukla R., Kesharwani P., *PAMAM dendrimer as a talented multifunctional biomimetic nanocarrier for cancer diagnosis and therapy*, „Colloids Surf B Biointerfaces” 2021, nr 204, 111837, <https://doi.org/10.1016/j.colsurfb.2021.111837>.
- [23] Malinga-Drozd M., Uram Ł., Wróbel K., Wołowiec S., *Chiral Recognition of Homochiral Poly (amidoamine) Dendrimers Substituted with R- and S-Glycidol by Keratinocyte (HaCaT) and Squamous Carcinoma (SCC-15) Cells In Vitro*, „Polymers” 2021, nr 13, 1049, <https://doi.org/10.3390/polym13071049>.
- [24] Luong D. et al., *PEGylated PAMAM dendrimers: Enhancing efficacy and mitigating toxicity for effective anticancer drug and gene delivery*, „Acta Biomaterialia” 2016, nr 43, s. 14–29, <https://doi.org/10.1016/j.actbio.2016.07.015>.
- [25] Ye F.B., Hamza A., Singh T., Flibotte S., Hieter P., O’Neil N.J., *A Multimodal Genotoxic Anticancer Drug Characterized by Pharmacogenetic Analysis in Caenorhabditis elegans*, „Genetics” 2020, nr 215, s. 609–621, <https://doi.org/10.1534/genetics.120.303169>.
- [26] Hunt P.R., *The C. elegans model in toxicity testing*, „Journal of Applied Toxicology” 2017, nr 37, s. 50–59, <https://doi.org/10.1002/jat.3357>.
- [27] Uram Ł., Wróbel K., Walczak M., Szymaszek Ż., Twardowska M., Wołowiec S., *Exploring the Potential of Lapatinib, Fulvestrant, and Paclitaxel Conjugated with Glycidylated PAMAM G4 Dendrimers for Cancer and Parasite Treatment*, „Molecules” 2023, nr 28, 6334, <https://doi.org/10.3390/molecules28176334>.
- [28] Perželová V. et al., *Pharmacological activation of estrogen receptors- α and - β differentially modulates keratinocyte differentiation with functional impact on wound healing*, „International Journal of Molecular Medicine” 2016, nr 37, s. 21–28, <https://doi.org/10.3892/ijmm.2015.2351>.
- [29] Ivanova M.M., Mazhawidza W., Dougherty S.M., Klinge C.M., *Sex Differences in Estrogen Receptor Subcellular Location and Activity in Lung Adenocarcinoma Cells*, „American Journal of Respiratory Cell and Molecular Biology” 2010, nr 42, s. 320–330, <https://doi.org/10.1165/rcmb.2009-0059OC>.

- [30] Leslie K.K., Keefe D., Powell S., Naftolin F., *Estrogen receptors are identified in the glioblastoma cell line U138MG*, „Journal of the Society for Gynecologic Investigation” 1994, nr 1, s. 238–244, doi: 10.1177/107155769400100311.
- [31] Zitron I.M., Thakur A., Norkina O., Barger G.R., Lum L.G., Mittal S., *Targeting and killing of glioblastoma with activated T cells armed with bispecific antibodies*, „BMC Cancer” 2013, nr 13, 83, <https://doi.org/10.1186/1471-2407-13-83>.
- [32] Garon E.B. et al., *Antiestrogen Fulvestrant Enhances the Antiproliferative Effects of Epidermal Growth Factor Receptor Inhibitors in Human Non-Small-Cell Lung Cancer*, „Journal of Thoracic Oncology” 2013, nr 8, s. 270–278, <https://doi.org/10.1097/JTO.0b013e31827d525c>.
- [33] Liebmman J.E., Cook J.A., Lipschultz C., Teague D., Fisher J., Mitchell J.B., *Cytotoxic studies of paclitaxel (Taxol®) in human tumour cell lines*, „British Journal of Cancer” 1993, nr 68, s. 1104–1109, <https://doi.org/10.1038/bjc.1993.488>.
- [34] Repetto G., Del Peso A., Zurita J.L., *Neutral red uptake assay for the estimation of cell viability/cytotoxicity*, „Nature Protocols” 2008, nr 3, s. 1125–1131, <https://doi.org/10.1038/nprot.2008.75>.
- [35] Mosmann T., *Rapid colorimetric assay for cellular growth and survival: application to proliferation and cytotoxicity assays*, „Journal of Immunological Methods” 1983, nr 65, s. 55–63, [https://doi.org/10.1016/0022-1759\(83\)90303-4](https://doi.org/10.1016/0022-1759(83)90303-4).
- [36] Khachigian L.M., *Emerging insights on functions of the anthelmintic flubendazole as a repurposed anticancer agent*, „Cancer Letters” 2021, nr 522, s. 57–62, <https://doi.org/10.1016/j.canlet.2021.09.013>.
- [37] Mimoto A. et al., *Identification of an estrogenic hormone receptor in Caenorhabditis elegans*, „Biochemical and Biophysical Research Communications” 2007, nr 364, s. 883–888, <https://doi.org/10.1016/j.bbrc.2007.10.089>.
- [38] Tominaga N. et al., *Caenorhabditis elegans Responses to Specific Steroid Hormones*, „Journal of Health Science” 2003, nr 49, s. 28–33, <https://doi.org/10.1248/jhs.49.28>.
- [39] Konietzka J. et al., *Epidermal Growth Factor Signaling Promotes Sleep through a Combined Series and Parallel Neural Circuit*, „Current Biology” 2020, nr 30, s. 1–16.e13, <https://doi.org/10.1016/j.cub.2019.10.048>.
- [40] O’Keeffe C., Greenwald I., *EGFR signal transduction is downregulated in C. elegans vulval precursor cells during dauer diapause*, „Development” 2022, nr 149, dev201094, <https://doi.org/10.1242/dev.201094>.
- [41] Sebaugh J.L., *Guidelines for accurate EC50/IC50 estimation*, „Pharmaceutical Statistics” 2011, nr 10, s. 128–134, <https://doi.org/10.1002/pst.426>.

Badanie użyteczności Cyfrowej Platformy Zdrowia Młodzieży

Szymon Wiśniewski, Urszula Konopko, Nikodem Szwed,
Eryk Śliwowski, Michał Lipka, Krzysztof Konopko
Politechnika Białostocka, Koło Naukowe Systemów Wbudowanych „W Sieci Rzeczy”
k.konopko@pb.edu.pl

Summary: The paper discusses the role of tests in creating the Digital Youth Health Platform. As a result of its crucial role in ensuring a user-friendly interface, special focus was placed on usability testing. The results of these tests provide important suggestions for improvements that can be made to increase the attractiveness and usability of the platform. The platform for which the tests were conducted is being developed as part of an international project implemented under the Erasmus+ program, in which Bialystok University of Technology is one of the participants. The platform is distinguished by an advanced interface in which artificial intelligence algorithms identify and personalize selected user features, and thus support the work of specialists.

Key words: usability tests, web applications, mobile applications

1. Wstęp

Cyfrowa Platforma Zdrowia Młodzieży (ang. *Digital Youth Health Platform*) to nazwa międzynarodowego projektu realizowanego w ramach programu Erasmus+ [1]. W jego realizację zaangażowane są dwie uczelnie: Ankara Yıldırım Beyazıt Üniversitesi (Turcja) jako lider projektu i Politechnika Białostocka jako partner. Wspierają je również organizacje społeczne: RESHA z siedzibą w belgijskim Berchem oraz tureckie DGH-ARGE Yazılım Danışmanlık Enerji Eğitim İnş. San. Tic. Ltd. Şti. w Malatyi oraz Digital Robotic Life w Wan. Celem projektu jest opracowanie wirtualnego środowiska, które łączy specjalistów udzielających porad z dziedziny zdrowia, sportu czy żywienia oraz użytkowników, do których te porady są adresowane. Wiarygodność tych pierwszych sprawdzana jest na podstawie dostarczanych i weryfikowanych certyfikatów. Docelowe grupy użytkowników platformy to: studenci, doktoranci, młodzież szkolna, lekarze specjaliści, trenerzy, dietetycy, nauczyciele wychowania fizycznego itp.

Platforma umożliwia przeprowadzanie bezpłatnych audiowizualnych konsultacji medycznych, a także realizację zdalnych spotkań z dietetykami czy z trenerami personalnymi. Wyróżnia ją zaawansowany interfejs człowiek-maszyna, w którym algorytmy sztucznej inteligencji oparte na sieciach neuronowych i głębokim uczeniu maszynowym są w stanie rozpoznawać, identyfikować i personalizować wybrane cechy użytkowników i tym samym wspomagać pracę specjalistów. Platforma umożliwia dostęp dla zarejestrowanych użytkowników zarówno z popularnych przeglądarek internetowych (Opera, Microsoft Edge, Google Chrome, Mozilla Firefox), jak i aplikacji uruchamianych na urządzeniach mobilnych.

W projekcie brali udział autorzy artykułu – członkowie Koła Naukowego Systemów Wbudowanych „W Sieci Rzeczy”. Ich zadaniem było opracowanie testów funkcjonalnych [2] i niefunkcjonalnych [3] umożliwiających testowanie aplikacji webowej i mobilnej. Opracowane metody testowania uwzględniały ich specyfikę [4, 5]. W przypadku aplikacji webowych [6, 7] testy skupiały się przede wszystkim na funkcjonalnościach, kompatybilności z różnymi przeglądarkami oraz responsywności. Dla aplikacji mobilnych [8] ważne było również sprawdzenie interakcji z ekranem dotykowym oraz analiza ich działania na różnych systemach operacyjnych i wariantach urządzeń.

Aby móc zacząć korzystać z portalu, konieczne jest testowanie aplikacji przed wdrożeniem, w trakcie i po wdrożeniu. W przypadku testów opisywanych w artykule były one opracowane pod kątem wykorzystania podczas wdrażania platformy. Miało to też znaczenie przy wyborze formy prowadzenia testów [9]. Rozważane było testowanie ręczne oraz automatyczne. Celem tych ostatnich testów jest analiza działania aplikacji realizowanej w jak najkrótszym czasie przy możliwie niewielkiej ilości zasobów. Możliwe jest to dzięki wykorzystaniu odpowiednich programów, do których zaliczyć można: Selenium IDE, Selenium WebDriver, JMeter, SoapUI, SikuliX, AutoIT i Katalon Studio [10]. Celem testowania manualnego jest również wykrycie nieprawidłowości w aplikacji. Bez użycia jakichkolwiek narzędzi do testowania automatycznego sprawdza się istotne cechy aplikacji, wykonuje przypadki testowe czy generuje się raporty. Do podstawowych wad testów manualnych zaliczyć można dużą podatność na błędy, częsty brak precyzyjnego rejestrowania wyników oraz zdecydowanie dłuższy czas, zwłaszcza w przypadku trudnych do wykonania zadań ręcznych. Do zalet natomiast można zaliczyć niskie koszty (brak konieczności ponoszenia kosztów narzędzi i wdrażania procesu automatyzacji) oraz szybką i dokładną informację zwrotną. Ten rodzaj testów bardzo dobrze sprawdza się przy testowaniu małych zmian związanych z procesem wdrażania aplikacji, co przy testach automatycznych może być problematyczne. Lepiej również wychodzi w testach eksploracyjnych i użyteczności [11, 12], które badają głównie subiektywne odczucia użytkownika aplikacji.

W związku z kluczowym testowaniem użyteczności jako formę testów wybrano ich manualną realizację. Ze względu na potrzeby wdrażania platformy opracowano także manualne testy funkcjonalne oraz przeprowadzono testy wydajności. W celu ewaluacji testy te zostały zrealizowane przez członków koła (autorów artykułu), a ich analizę zaprezentowano w kolejnych rozdziałach.

2. Testy funkcjonalne

Celem testów funkcjonalnych [2] jest sprawdzenie realizacji zakładanych funkcji aplikacji. Badanie to bazuje na specyfikacji funkcjonalnej aplikacji, a jeżeli taki dokument nie istnieje, polega na konsultacjach z testerami. Nie wymaga się od nich wiedzy na temat struktury wewnętrznej i znajomości kodu, dlatego często stosuje się technikę czarnoskrzynkową do projektowania przypadków testowych. Testy funkcjonalne były kluczowym elementem wdrażania projektu, ponieważ dzięki nim możliwe było wyszukanie, raportowanie oraz wyeliminowanie defektów istotnych dla poprawnego funkcjonowania platformy. Proces testowania polegał na rozpisaniu przypadków testowych, które sprawdzały określone funkcjonalności aplikacji. Rozpisanie i późniejsza realizacja przypadków testowych dostarczyły szczegółowych informacji związanych z błędami oraz poprawkami wprowadzanymi w oprogramowaniu. Przykład formularza przygotowanego testerom wraz z przykładowymi przypadkami testowymi został pokazany w tabeli 1.

TABELA 1. Przykłady rozpisania przypadków testowych

ID	Opis	Oczekiwany rezultat	Zaobserwowany rezultat	Komentarz	Status
1.	Widok panelu startowego	panel startowy jest widoczny			poprawny niepoprawny
1.1.	Otwarcie aplikacji bez logowania	panel startowy jest widoczny			poprawny niepoprawny
1.2.	Panel startowy powinien być widoczny	panel startowy jest widoczny			poprawny niepoprawny
2.	Więcej informacji o platformie	strona <i>Więcej informacji o platformie</i> jest widoczna			poprawny niepoprawny
2.1.	Widok panelu startowego	panel startowy jest widoczny			poprawny niepoprawny
2.2.	Kliknij <i>Więcej informacji o platformie</i>	jest możliwość wciśnięcia przycisku			poprawny niepoprawny
2.3.	Strona <i>Więcej informacji o platformie</i> powinna być widoczna	strona <i>Więcej informacji o platformie</i> jest widoczna			poprawny niepoprawny
3.	Powrót z <i>Więcej informacji o platformie</i> do panelu startowego za pomocą przycisku wstecz na telefonie	panel startowy jest widoczny			poprawny niepoprawny
3.1.	Strona <i>Więcej informacji o platformie</i> jest widoczna	strona <i>Więcej informacji o platformie</i> jest widoczna			poprawny niepoprawny

ID	Opis	Oczekiwany rezultat	Zaobserwowany rezultat	Komentarz	Status
3.2.	Kliknij przycisk wstecz na telefonie	jest możliwość wciśnięcia przycisku			poprawny niepoprawny
3.3.	Panel startowy powinien być widoczny	panel startowy jest widoczny			poprawny niepoprawny
4.	Powrót z <i>Więcej informacji o platformie</i> do panelu startowego za pomocą przycisku powrót	panel startowy jest widoczny			poprawny niepoprawny
4.1.	Strona <i>Więcej informacji o platformie</i> jest widoczna	strona <i>Więcej informacji o platformie</i> jest widoczna			poprawny niepoprawny
4.2.	Kliknij przycisk powrót	jest możliwość wciśnięcia przycisku			poprawny niepoprawny
4.3.	Panel startowy powinien być widoczny	panel startowy jest widoczny			poprawny niepoprawny

ŹRÓDŁO: opracowanie własne.

Wszystkie błędy, które zostały wykryte w trakcie realizacji testów, były również wysłane do programistów odpowiedzialnych za implementację określonych funkcji aplikacji. W zgłoszeniach każdego błędu znajdował się dokładny opis zauważonych problemów, kroki postępowania, które trzeba było zrealizować, aby zgłaszany problem się pojawił, oczekiwany rezultat oraz zaobserwowany rezultat. Przykładowy raport zgłaszania błędu został pokazany na rys. 1.

Możliwość stworzenia konta bez imienia i nazwiska. Imię i nazwisko nie są wymagane w rejestracji użytkownika, jednak przy wiadomości powitalnej, która jest wyświetlana na stronie „User panel”, nie wyświetla się nawet <i>username</i> użytkownika. Zostaje tylko wiadomość „Welcome, ” Kroki: 1. Rejestruję użytkownika ze wszystkimi niezbędnymi informacjami bez podanego imienia oraz nazwiska. 2. Po utworzeniu konta przechodzę na stronę „User panel”. 3. Na ekranie nie wyświetla się poprawna wiadomość powitalna. Oczekiwany wynik: wiadomość powitalna przy braku imienia i nazwiska powinna wyświetlać jego <i>username</i> bądź imię i nazwisko powinny być informacjami wymaganymi przy rejestracji. Zaobserwowany wynik: na stronie głównej wyświetla się wiadomość „Welcome, .”, a informacje takie jak imię i nazwisko nie są obowiązkowe.
--

RYŚ. 1. Przykładowy raport zgłaszania błędu

ŹRÓDŁO: opracowanie własne.

3. Testy użyteczności

Testy użyteczności są przykładem testów niefunkcjonalnych [3], które skupiają się na wszystkich aspektach oprogramowania niezwiązanych bezpośrednio z funkcjonalnościami, np. na wydajności, kompatybilności, użyteczności [11, 12], niezawodności czy bezpieczeństwie. Tego rodzaju testy mają kluczowe znaczenie dla satysfakcji użytkowników. Opracowane testy niefunkcjonalne dotyczyły głównie subiektywnych odczuć zwykłego użytkownika. Najważniejszym aspektem tych testów było sprawdzenie estetyki interfejsu graficznego panelu. Udział w nich wzięło 20 studentów i studentek studiów I i II stopnia studiujących na różnych wydziałach Politechniki Białostockiej. Do każdego zgłaszanego błędu dodawano zdjęcia je odzwierciadlające. Przykładowy raport błędu został pokazany na rys. 2.

Nieprzeskalowana tabelka na stronie „My specialists”
Tabelka znajdująca się w zakładce „My specialists”
przycina się przy ostatniej kolumnie

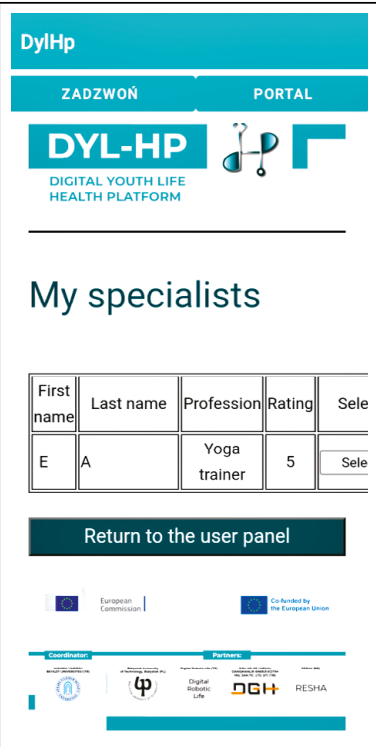
Kroki:

1. Będąc na stronie „User panel”, przechodzę do strony „Specialist search” poprzez wciśnięcie przycisku „Search a specialist”.
2. Wyszukuję jednego z specjalistów, zaznaczając konkretną kategorię, oraz przechodzę na stronę „Specialist search results” poprzez wciśnięcie przycisku „Search” (przykładowe kategorie: Profession: yoga trainer, Country: Poland, Language: polski).
3. Przechodzę do strony „Your selected professional” poprzez wciśnięcie przycisku „Select”.
4. Dodaję specjalistę do swojej listy poprzez wciśnięcie przycisku „Add this specialist to your list”.
5. Będąc na stronie „The specialist was added to your list”, przechodzimy na stronę „My specialists” poprzez wciśnięcie przycisku „Go to your specialist list”.

Oczekiwany wynik: tabelka powinna mieścić się cała na szerokości telefonu.

Zaobserwowany wynik: tabelka nie jest całkowicie widoczna, ponieważ ucina się w połowie ostatniej kolumny.

Zdjęcie do tego problemu oznakowane jest jako Bug1.1.png



RYS. 2. Przykładowy raport błędu

ŹRÓDŁO: opracowanie własne.

Oprócz estetyki w ocenie użytkowej ważną rolę odgrywają też łatwość i wygoda, z jaką użytkownik posługuje się udostępnianym przez aplikację interfejsem. Dlatego też sporządzona została instrukcja, na podstawie której testerzy mogli oceniać dostęp i wygodę realizacji poszczególnych funkcji zarówno w aplikacji mobilnej, jak i webowej.

Ocenianie odbywało się w skali od jednego do pięciu, przy czym ocena jeden uważana była za najgorszą, a pięć za najlepszą. Opracowana ankieta z pytaniami dla testerów została pokazana w tabelach 2 i 3.

TABELA 2. Ankieta z pytaniami dla testerów (pytania 1–6)

Pytania	Średnia (aplikacja mobilna)	Średnia (aplikacja webowa)	Całkowita średnia
1. Strona główna			
1.1. Czy wszystkie przyciski są łatwo dostępne, widoczne oraz czy spełniają swoją funkcjonalność?	3	3,5	3,25
1.2. Czy strona główna wygląda estetycznie?	2	2,5	2,25
Całkowita średnia	2,5	3	2,75
2. Proces rejestracji			
2.1. Czy jasno jest zadeklarowane, jakie informacje powinny zostać umieszczone w formularzu rejestracji?	5	5	5
2.2. Czy strona rejestracji wygląda estetycznie?	4,5	4	4,25
Całkowita średnia	4,75	4,5	4,63
3. Proces logowania			
3.1. Czy jasno jest zadeklarowane, jakie informacje powinny zostać umieszczone w formularzu logowania?	5	5	5
3.2. Czy strona rejestracji wygląda estetycznie?	5	4,5	4,75
Całkowita średnia	5	4,75	4,9
4. Panel użytkownika			
4.1. Czy wszystkie przyciski są łatwo dostępne, widoczne oraz czy spełniają swoją funkcjonalność?	3,5	4	3,75
4.2. Czy strona panelu użytkownika wygląda estetycznie?	3,5	3	3,25
Całkowita średnia	3,5	3,5	3,5
5. Proces edycji profilu			
5.1. Czy wszystkie informacje o profilu są łatwo dostępne?	3,5	4,5	4
5.2. Czy wprowadzanie zmian w zakresie pisemnym jest intuicyjne?	4,5	3,5	4
5.3. Czy wprowadzanie zmian w zakresie multimedialnym jest intuicyjne?	3,5	4,5	4
5.4. Czy strona edycji profilu wygląda estetycznie?	2,5	3,5	2,5
Całkowita średnia	3,5	3,75	3,63

Pytania	Średnia (aplikacja mobilna)	Średnia (aplikacja webowa)	Całkowita średnia
6. Proces wyszukiwania specjalisty			
6.1. Czy wyszukiwanie strony specjalisty jest intuicyjne?	4,5	3	3,75
6.2. Czy filtry, po których wyszukiwany jest specjalista, są przydatne?	3	2,5	2,75
6.3. Czy preferencje wybrane podczas wyszukiwania prezentują się prawidłowo w wynikach?	4,5	4,5	4,5
6.4. Czy strona specjalisty dostarcza jasnych i łatwo dostępnych informacji na temat wyszukanego specjalisty?	3,5	3,5	3,5
6.5. Czy strona specjalisty wygląda estetycznie?	3,5	4,5	4
Całkowita średnia	3,8	3,6	3,67

ŹRÓDŁO: opracowanie własne.

TABELA 3. Ankieta z pytaniami dla testerów (pytania 7–9)

Pytania	Średnia (aplikacja mobilna)	Średnia (aplikacja webowa)	Całkowita średnia
7. Proces umawiania wizyty			
7.1. Czy strona do umawiania wizyt jest łatwo dostępna?	4	4	4
7.2. Czy wybieranie terminu odbycia wizyty odbywa się w intuicyjny sposób?	4	4,5	4,25
7.3. Czy informacje o umówionej wizycie są jasno zadeklarowane na stronie?	4,5	4,5	4,5
7.4. Czy strona umawiania wizyty wygląda estetycznie?	2,5	3,5	3
Całkowita średnia	3,75	4,13	3,94
8. Proces realizacji wizyty			
8.1. Czy dostanie się na umówioną uprzednio wizytę jest intuicyjne?	1,5	2,5	2
8.2. Czy informacje o rozpoczętej wizycie są łatwo dostępne?	4	3,5	3,75
8.3. Czy funkcjonalności związane z przekazem informacji audio oraz przez czat tekstowy są intuicyjne?	4	2,5	3,25
8.4. Czy panel ocenienia specjalisty po spotkaniu w jasny sposób przekazuje kryteria jego oceniania oraz czy ma rzetelne odniesienie do oceny specjalisty?	3	4,5	3,75
8.5. Czy strona realizacji wizyty wygląda estetycznie?	4	5	4,5
Całkowita średnia	3,3	3,6	3,45
9. Proces realizacji rozmów			
9.1. Czy strona do realizacji połączeń audio/video jest łatwo dostępna?	3,5	3	3,25

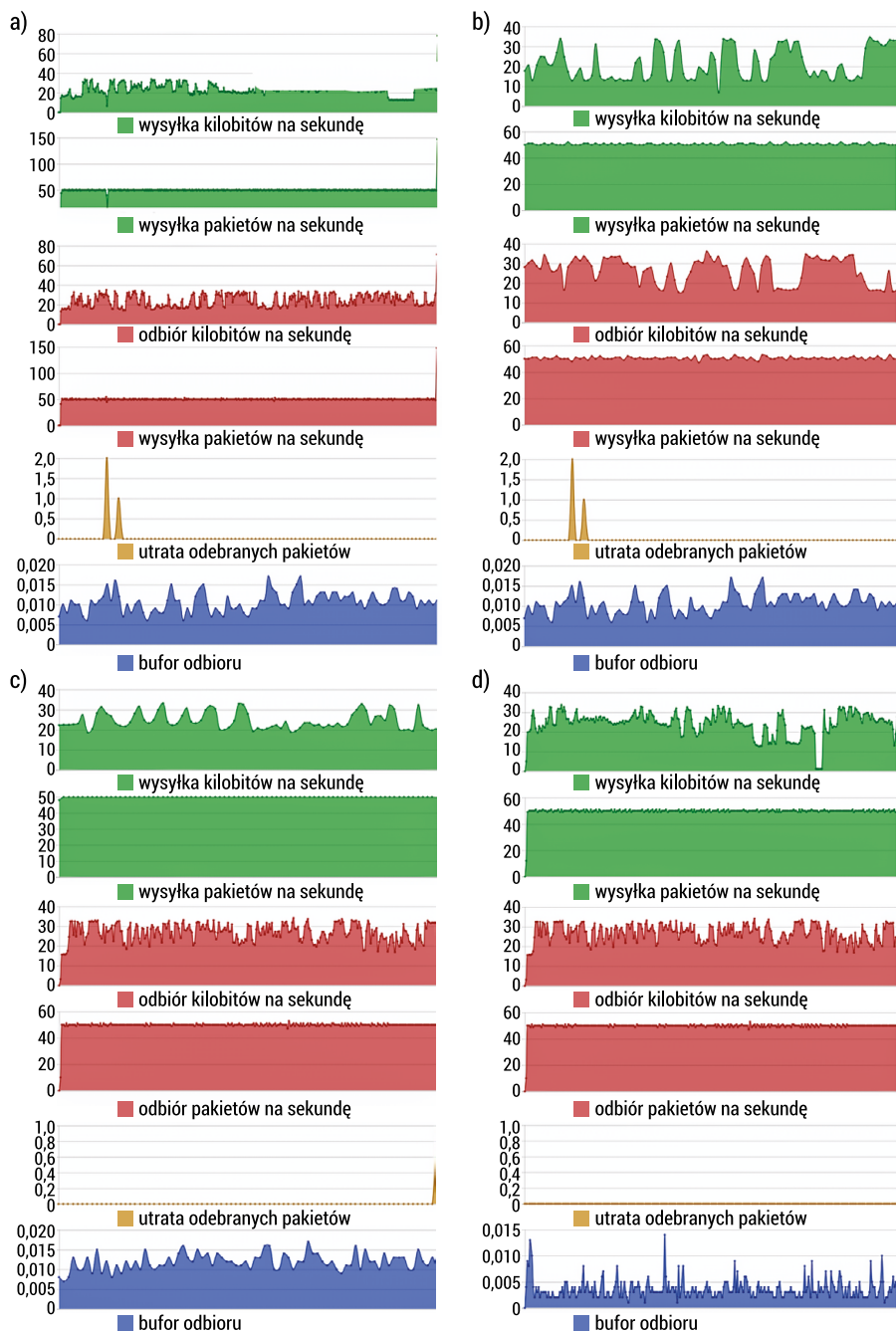
Pytania	Średnia (aplikacja mobilna)	Średnia (aplikacja webowa)	Całkowita średnia
9.2. Czy czat oraz nawiązywanie połączeń są intuicyjne?	3,5	4,5	4
9.3. Czy wszelkie ustawienia dotyczące urządzeń takich jak mikrofon czy słuchawki są łatwo dostępne i intuicyjne?	3	3,5	3,25
9.4. Czy strona realizacji rozmów wygląda estetycznie?	4,5	3,5	4
Całkowita średnia	3,63	3,63	3,63
Całkowita średnia aplikacji	3,75	3,83	3,79

ŹRÓDŁO: opracowanie własne.

Wyniki zawarte w tabelach 2 i 3 można analizować na wiele sposobów. Jednym z nich jest porównanie otrzymanych wartości średnich w poszczególnych kategoriach. Z ankiety wynika, że najniższą średnią uzyskała kategoria „Strona główna”. Jak można zauważyć, średnią zaniżają głównie oceny wyglądu estetycznego strony. Aby podwyższyć tę ocenę, należałoby poprawić oprawę graficzną aplikacji. Uśredniając wszystkie pytania związane z estetyką aplikacji, otrzymano wartość w przybliżeniu 3,6, z czego średnia za estetykę samej strony głównej wyniosła 2,25. Kolejnym aspektem porównawczym są zaobserwowane różnice w ocenie interfejsów użytkownika udostępnianych w wersji mobilnej i webowej. W kategorii strony głównej korzystniej prezentuje się aplikacja webowa. Natomiast w kategorii procesu logowania oraz rejestracji przewagę ma aplikacja mobilna. Główny wpływ na tę różnicę ma estetyka obu interfejsów. Estetyka stron logowania/rejestracji uzyskuje lepsze oceny w aplikacji mobilnej, a estetyka głównego panelu jest lepiej oceniana w aplikacji webowej. W obu wersjach aplikacji jedną z najniższych ocen wśród pojedynczych zapytań otrzymała opcja związana z dostaniem się na uprzednio umówioną wizytę. Zarówno w aplikacji mobilnej, jak i na stronie internetowej nie ma żadnego przycisku ani opcji, która automatycznie przeniosłaby użytkownika na umówioną wizytę, co utrudnia sprawne korzystanie z dostępu do specjalistów.

4. Testy wydajności

Testy wydajności, choć nie były kluczowe w tej fazie wdrażania projektu, zostały przeprowadzone dla aplikacji internetowej uruchamianej w czterech różnych przeglądarkach: Microsoft Edge, Mozilla Firefox, Google Chrome i Opera GX. Obie aplikacje (webowa i mobilna) do zestawiania połączeń głosowych i wideo wykorzystywały standard WebRTC [13, 14]. W trakcie badań analizowano dane dotyczące parametrów transmisji, w tym: wysyłania i odbioru danych, utraty odebranych pakietów i poziomu buforowania danych. Przykładowe wykresy pokazano na rys. 3.



RYS. 3. Przykładowe przebiegi wysyłania i odbioru danych, utraty odebranych pakietów i poziomu buforowania danych dla czterech przeglądarek: a) Microsoft Edge, b) Mozilla Firefox, c) Google Chrome i d) Opera GX

ŹRÓDŁO: opracowanie własne.

Analiza otrzymanych danych wykazała, że testowana aplikacja działała poprawnie we wszystkich czterech przeglądarkach. Potwierdziły to też subiektywne testy użytkowników, którzy nie stwierdzili trudności w zestawianiu połączeń audio i wideo. W ramach testów wydajności przeanalizowano także zużycie zasobów systemu podczas działania aplikacji na poszczególnych przeglądarkach. Wyniki testów zajętości czasu CPU i GPU, ilości pamięci oraz prędkości transmisji przy uruchamianiu aplikacji w różnych przeglądarkach internetowych zostały zawarte w tabelach 4 i 5.

TABELA 4. Wyniki testów zużycia zasobów systemu podczas działania aplikacji realizującej połączenia audio

Rozmowa telefoniczna (połączenie głosowe)				
przeglądarki	procesor	RAM	karta graficzna	sieć
Firefox	2,2–3,6%	630 Mb	0,3–1,8%	0,1 Mb/s
Chrome	1–2,5%	220–280 Mb	0,4–0,7%	0,1–0,2 Mb/s
Opera Gx	2–3,5%	335,5 Mb	0,7–1,9%	0,1 Mb/s
Microsoft Edge	1,5–3%	362,1 Mb	0–0,4%	0,1 Mb/s

ŹRÓDŁO: opracowanie własne.

TABELA 5. Wyniki testów zużycia zasobów systemu podczas działania aplikacji realizującej połączenia wideo

Połączenie wideo				
Przeglądarki	procesor	RAM	karta graficzna	sieć
Firefox	6,5–8,5%	680 Mb	12–17%	4,5 Mb/s
Chrome	7,5–8,5%	340–370 Mb	0,5–1,5%	4,4–6 Mb/s
Opera Gx	7,6–9,2%	361 Mb	3,3–4,3%	4,4 Mb/s
Microsoft Edge	5–7,3%	427,5–429,4 Mb	5–5,3%	4,4 Mb/s

ŹRÓDŁO: opracowanie własne.

Z analizy otrzymanych danych wynika, że najmniejsze zużycie procesora zapewniały przeglądarki Microsoft Edge i Chrome. Najwięcej zasobów spośród testowanych przeglądarek – zarówno jeśli chodzi o użycie pamięci, jak i obciążenie karty graficznej w trakcie realizacji połączeń wideo – wykorzystywała przeglądarka Firefox.

5. Podsumowanie

W artykule zaprezentowano proces tworzenia testów do analizy funkcjonalnej i nie-funkcjonalnej aplikacji webowej i mobilnej umożliwiających dostęp do zasobów wdrażanej Cyfrowej Platformy Zdrowia Młodzieży. Ze względu na kluczową rolę

w zapewnieniu przyjaznego interfejsu użytkownika szczególny nacisk położono na opracowanie testów użyteczności. Ten rodzaj testowania wymaga szczególnego doświadczenia osób kierujących zespołem testerów, użyteczność nie jest bowiem parametrem mierzalnym obiektywnie. Oceny znacznej części elementów list kontrolnych zależą od subiektywnych upodobań i doświadczeń testerów. Poprawne przygotowanie środowiska testowego daje jednak gwarancję spójności i porównywalnych wyników oceny aplikacji dokonywanych przez poszczególnych testerów. Testy użyteczności stanowią kluczowy element oceny platformy, ponieważ skupiają się na tym, jak łatwo i efektywnie użytkownicy mogą z niej korzystać. Oceniają, czy interfejs jest intuicyjny, czy proces rejestracji i nawigacji jest klarowny, czy przy minimalnym wysiłku użytkownicy mogą znaleźć potrzebne im informacje. Ponadto testy użyteczności pozwalają na identyfikację ewentualnych problemów interakcji, które mogą frustrować użytkowników i prowadzić do rezygnacji z korzystania z aplikacji.

Podsumowując, przeprowadzone badania testowe aplikacji webowej i mobilnej należy uznać za ważny element w tworzeniu Cyfrowej Platformy Zdrowia Młodzieży. Wyniki testów umożliwiły sformułowanie listy istotnych problematycznych elementów wraz z rekomendacjami dotyczącymi usprawnień zwiększających atrakcyjność i użyteczność platformy.

Literatura

- [1] *Digital Youth Life Health Problem*, <https://erasmus-plus.ec.europa.eu/projects/search/details/2021-2-TR01-KA220-YOU-000049540> [dostęp: 14.11.2023].
- [2] Smilgin R., *Zawód tester. Od decyzji do zdobycia doświadczenia*, WN PWN, Warszawa 2018.
- [3] Müller T., Graham D., Friedenberg D., van Veedendaal E., *ISTQB certified tester-foundation level syllabus*, 2007.
- [4] Roman A., *Testowanie i jakość oprogramowania: modele, techniki, narzędzia*, WN PWN, Warszawa 2015.
- [5] Myers G.J., Sandler C., Badgett T., *The art of software testing*, John Wiley & Sons, Hoboken 2011.
- [6] Li Y.F., Das P.K., Dowe D.L., *Two decades of Web application testing – A survey of recent advances*, „Information Systems” 2014, nr 43, s. 20–54.
- [7] Superson W., Smyk T., Plechawska-Wójcik M., *Comparative analysis of methods for testing web applications*, „Journal of Computer Sciences Institute” 2023, nr 28, s. 236–241.
- [8] Borys M., Plechawska-Wójcik M., *Badanie użyteczności oraz dostępności interfejsu w aplikacjach mobilnych*, „Nierówności Społeczne a Wzrost Gospodarczy” 2013, nr 35, s. 63–78.
- [9] *Testowanie manualne i automatyczne. Różnice*, 2022, <https://testerzy.pl/baza-wiedzy/artykuly/testowanie-manualne-i-automatyczne-roznice> [dostęp: 14.11.2023].
- [10] Szczepkowicz Ł., Pańczyk B., *Ocena jakości wybranych narzędzi do automatyzacji testów aplikacji*, „Journal of Computer Sciences Institute” 2018, nr 9, s. 324–327.
- [11] Quesenbery W., *Balancing the 5Es of usability*, „Cutter IT Journal” 2004, nr 17(2), s. 4–11.
- [12] Roman A., Zmitrowicz K., *Testowanie oprogramowania w praktyce: studium przypadków*, WN PWN, Warszawa 2017.

- [13] Daoust F., Hazaël-Massieux D., *Web Real-Time Communications Working Group Charter*, 2015, <https://www.w3.org/2011/04/webrtc-charter.html> [dostęp: 14.11.2023].
- [14] Levent-Levi T., *WebRTC Test: Testing Made Easy*, 2021, <https://testrtc.com/webrtc-testing-made-easy/> [dostęp: 14.11.2023].

Spis tabel

System jezdny analogu łoża marsjańskiego

Tabela 1. Protokół komunikacyjny	15
--	----

Analiza porównawcza systemów certyfikacji budynków BREEAM, LEED i WELL

Tabela 3.1. Podstawowe informacje o systemach certyfikacji BREEAM, LEED i WELL.....	25
Tabela 3.2. Podejście do zarządzania wodą w systemach certyfikacji BREEAM, LEED i WELL.....	28
Tabela 3.3. Podejście do skomunikowania budynku w systemach certyfikacji BREEAM, LEED i WELL.....	29
Tabela 3.4. Wymagania stawiane materiałom w systemach certyfikacji BREEAM, LEED i WELL.....	30

Badanie satysfakcji pasażerów metodą CSI – wyniki analiz wśród pokolenia Z

Tabela 1. Kryteria oceny CSI %	62
Tabela 2. Szczegółowa analiza sześciu badanych obszarów	64
Tabela 3. Obliczenie CSI, CSI max oraz CSI %	65
Tabela 4. Kryteria wyznaczenia punktów podziału mapy jakości	66

Koncepcja rozbudowy dróg rowerowych Velo Wisłok na obrzeżach Rzeszowa

Tabela 1. Maksymalne pochylenie niwelety w zależności od różnicy wysokości i długości pochylenia	76
Tabela 2. Zależność pomiędzy prędkością a minimalnymi promieniami łuków pionowych	77
Tabela 3. Zestawienie przyjętych parametrów przekroju.....	83

Algorytm modyfikacji orientacji narzędzia robota przemysłowego w procesie wytwarzania addytywnego

Tabela 1. Specyfikacja robota i kontrolera	95
Tabela 2. Komponenty niezbędne do budowy zrobotyzowanego stanowiska druku 3D i modyfikacji robota.....	95

Wpływ temperatury na pracę ogniwa słonecznego

Tabela 1. Urządzenia wykorzystane do pomiarów.....	106
Tabela 2. Dane pomiarowe uzyskane z modułów fotowoltaicznych technologii CdTe.....	108

Tabela 3.	Dane pomiarowe uzyskane z modułów fotowoltaicznych technologii krzemu amorficznego	109
Tabela 4.	Dane pomiarowe uzyskane z modułów fotowoltaicznych technologii CIS.....	110
Tabela 5.	Dane pomiarowe uzyskane z modułów fotowoltaicznych technologii polikrystalicznego krzemu.....	111
Tabela 6.	Technologie badanych modułów fotowoltaicznych	112

Analiza naprężenia oraz ciśnienia podczas przemieszczania się leja względem kikuta

Tabela 1.	Właściwości materiałów użytych w badaniach.....	136
Tabela 2.	Uzyskane parametry naprężenia, ciśnienia i siły reakcji ze wszystkich wariantów obliczeń	138

Tajniki smaku. Część 1: Analiza tekstury przekąsek

Tabela 1.	Specyfikacja techniczna teksturometru TA.XT Texture Analyzer	147
-----------	--	-----

Tajniki smaku. Część 2: Analiza jakości miodów

Tabela 1.	Procentowa zawartość wody w miodzie w zależności od współczynnika załamania światła (n_D^{20}) oraz aktywności wody	165
Tabela 2.	Wyniki badań stopnia kwasowości ogólnej, odczynu (pH) i przewodności właściwej elektrolitycznej badanych miodów	166

Ocena potencjału terapeutycznego koniugatów glicydylowanych dendrymerów PAMAM generacji czwartej z lapatynibem, fulwestrantem i/lub paklitakselem w chorobach nowotworowych i pasożytniczych

Tabela 1.	Porównanie właściwości koniugatów dendrymeru PAMAM G4 z lapatynibem (L), fulwestrantem (F) i/lub paklitakselem (P), opłaszczonych glicydołem (gl)	174
Tabela 2.	Wartości połowy maksymalnego stężenia hamującego (IC_{50}) oznaczone po 48 h traktowania komórek A549, U-118 MG i HaCaT paklitakselem, fulwestrantem, lapatynibem i ich koniugatami z glicydylowanymi dendrymerami PAMAM G4: G4P, G4F, G4L oraz G4PFL	176
Tabela 3.	Wartości stężenia letalnego (LC_{50}) określone po 7-dniowym traktowaniu <i>Caenorhabditis elegans</i> G4P, G4F, G4L i G4PFL.....	178

Badanie użyteczności Cyfrowej Platformy Zdrowia Młodzieży

Tabela 1.	Przykłady rozpisania przypadków testowych	187
Tabela 2.	Ankieta z pytaniami dla testerów (pytania 1–6).....	190
Tabela 3.	Ankieta z pytaniami dla testerów (pytania 7–9).....	191
Tabela 4.	Wyniki testów zużycia zasobów systemu podczas działania aplikacji realizującej połączenia audio.....	194
Tabela 5.	Wyniki testów zużycia zasobów systemu podczas działania aplikacji realizującej połączenia wideo	194

Spis rysunków

System jezdny analogu łoża marsjańskiego

Rys. 1. Konstrukcja mechaniczna.....	8
Rys. 2. Konstrukcja ramy.....	9
Rys. 3. Analiza elementów skończonych konstrukcji ramy	9
Rys. 4. Analiza elementów skończonych kół	10
Rys. 5. Analiza metodą elementów skończonych wahaczy.....	11
Rys. 6. Model czynnego elementu zawieszenia	12
Rys. 7. Schemat blokowy systemu jezdny łoża.....	13

Analiza porównawcza systemów certyfikacji budynków BREEAM, LEED i WELL

Rys. 2.1. Liczba certyfikowanych budynków w Polsce (stan na marzec 2023 r.).....	20
Rys. 2.2. Podział branżowy certyfikowanych budynków	21
Rys. 2.3. Biurowiec V.Offices.....	22
Rys. 2.4. Nowy Rynek, budynek D1 i D2	23
Rys. 2.5. Varso Tower.....	24

Układ napędowy motocykla elektrycznego zasilanego ogniwami litowo-jonowymi

Rys. 1. Dwa akumulatory litowo-jonowe w technologii NMC	37
Rys. 2. Przedstawienie graficzne wektorów pól elektromagnetycznych umieszczonych na wirniku	39
Rys. 3. Przebieg sinusoidalny trzech napięć przesuniętych fazowo o 120°	40
Rys. 4. Przebieg napięcia po zastosowaniu przekształcenia Clarke.....	40
Rys. 5. Wartości dwóch wektorów wirujących wraz z polem magnetycznym wirnika	40
Rys. 6. Część kodu wygenerowanego na mikrokontroler za pomocą środowiska Simulink	42
Rys. 7a. Model symulacyjny silnika BLDC o sterowaniu wektorowym. Sektory: różowy – część regulująca pracę silnika, fioletowy – symulacja działania silnika BLDC.....	43
Rys. 7b. Model symulacyjny silnika BLDC o sterowaniu wektorowym. Sektory: brązowy – utworzenie napięcia trójfazowego sinusoidalnego oraz przekształcenia Clarke, zielony – przekształcenia Park i sterowanie przekształtnikiem AC/DC.....	44
Rys. 8. Układ badawczy silnika BLDC przy sterowaniu wektorowym	45

Najnowsze wyzwania w cyberbezpieczeństwie – analiza rosnących zagrożeń online

Rys. 1. ChatGPT 3.5 w tworzeniu wirusów	48
Rys. 2. Nieszkodliwy wirus.....	48
Rys. 3. Sztucznie wygenerowane zdjęcia sławnych osób	53
Rys. 4. Deepfake porwania Donalda Trumpa.....	54
Rys. 5. Udział pracujących, którzy w związku z sytuacją epidemiczną pracowali zdalnie według sektorów własności.....	55
Rys. 6. One Drive Phishing	55

Badanie satysfakcji pasażerów metodą CSI – wyniki analiz wśród pokolenia Z

Rys. 1. Struktura odpowiedzi na pytanie o płeć	63
Rys. 2. Wiek respondentów	63
Rys. 4. Obszary mapy jakości.....	66
Rys. 5. Mapa jakości usług dla MPK Rzeszów.....	67

Koncepcja rozbudowy dróg rowerowych Velo Wisłok na obrzeżach Rzeszowa

Rys. 1. Wytyczne dotyczące infrastruktury dla rowerów według CROW	72
Rys. 2. <i>Cycling through Water</i> – ścieżka rowerowa w Belgii biegnąca przez środek jeziora	73
Rys. 3. Adaptacja wiaduktu kolejowego na drogę dla rowerów w powiecie nowosolskim	73
Rys. 4. Budowa trasy rowerowej na kładce posadowionej na palach.....	74
Rys. 5. Planowanie tras dla rowerów.....	75
Rys. 6. Prędkość do projektowania tras rowerowych w zależności od rodzaju infrastruktury i klasy funkcjonalno-technicznej: V – велоstrada, P – trasa podstawowa, U – trasa uzupełniająca	75
Rys. 7. Żwirowa droga dojazdowa za kładką w Boguchwale.....	78
Rys. 8. Odcinek z infrastrukturą rowerową. ZUW – zakład uzdatniania wody, Fot. 1 zob. Rys. 9, TR1 – istniejąca infrastruktura rowerowa w obrębie Rzeszowa, Fot. 2 – zob. Rys. 10.....	78
Rys. 9. Odcinek DK19, na którym jest utrudniony ruch rowerowy – Fot. 1 na Rys. 8.....	79
Rys. 10. Odcinek na ulicy Kwiatkowskiego, na którym jest utrudniony ruch rowerowy – Fot. 2 na Rys. 8.....	79
Rys. 11. Jezdnia z wydzielonym pasem dla rowerów na ulicy Księdza Józefa Jałowego w Rzeszowie	79
Rys. 12. Przebieg koncepcji w terenie (1/2)	80
Rys. 13. Przebieg koncepcji w terenie (2/2)	81
Rys. 14. Układ warstw ścieżki rowerowej w przekroju drewnianym	82
Rys. 15. Układ warstw ścieżki rowerowej o przekroju bitumicznym.....	82
Rys. 16. Typowa konstrukcja nawierzchni jezdni przeznaczona do ruchu bardzo lekkiego	82
Rys. 17. Miejsce obsługi podróżnych km 2+900.....	84

Algorytm modyfikacji orientacji narzędzia robota przemysłowego w procesie wytwarzania addytywnego

Rys. 1. Przykład zrobotyzowanego druku 3D i wytworzonego w tym procesie elementu....	88
Rys. 2. Robot spawalniczy Kawasaki Robotics	89
Rys. 3. Zrobotyzowane stanowisko klejenia w środowisku OLP	90
Rys. 4. Wykorzystanie robota w procesie frezowania.....	90
Rys. 5. Porównanie druku: a) technika non-planar 3D printing, b) klasyczny wydruk.....	91
Rys. 6. Zaproponowany algorytm modyfikacji orientacji narzędzia robota przemysłowego w procesie wytwarzania addytywnego	92
Rys. 7. Kod źródłowy skryptu opracowanego w pakiecie Matlab realizujący zaproponowany algorytm modyfikacji orientacji narzędzia robota przemysłowego	93
Rys. 8. Rezultaty działania opracowanego skryptu.....	94
Rys. 9. Stanowisko laboratoryjne wyposażone w robota Kawasaki RS003N	94
Rys. 10. Stanowisko zrobotyzowanego druku 3D.....	96
Rys. 11. Odwzorowanie stanowiska w środowisku RoboDK.....	96
Rys. 12. Testowanie opracowanych programów robota.....	97

Wpływ temperatury na pracę ogniwa słonecznego

Rys. 1. Efekt fotowoltaiczny.....	102
Rys. 2. Złącze p-n.....	102
Rys. 3. Budowa modułu fotowoltaicznego I generacji.....	103
Rys. 4. Miernik temperatury przymocowany do szyny fotowoltaicznej.....	107
Rys. 5. Montaż czujnika temperatury modułu fotowoltaicznego	107
Rys. 6. Pomiar prędkości wiatru.....	108
Rys. 7. Ogniwo cienkowarstwowe.....	113
Rys. 8. Temperatura ogniwa w zależności od prędkości wiatru w radiatorze.....	113
Rys. 9. Technologia chłodzenia obiegiem wody.....	114
Rys. 10. Moduły ustawione na wodzie	114

Doskonalenie systemu logistycznego na przykładzie Grupy Aliplast

Rys. 1. Zdjęcie satelitarne Grupy Aliplast	119
Rys. 2. Nomenklatura Grupy Aliplast. Hala A: A1 – zarząd, sekretariat, kadry, księgowość, A2 – centrum szkoleniowe, magazyn akcesoriów, A3–6 – magazyn, A3 – lakiernia Decoral, A7 – lakiernia Promal, A8–11 – lakiernia pozioma Adal, biuro lakierni, Hala B: B1 – lakiernia pozioma AABO – zakładanie, zdejmowanie, B2–B3 – magazyn – zbieranie, B4 – CNC, B5 – owijarki, B6 – magazyn, B7 – lakiernia pionowa VL2, Hala C: C1 – biuro, szatnie, magazyn proszków, C2 – oczyszczalnia, C3 – lakiernia pionowa VL1, C4 – wykładanie i oklejanie, C5 – lakiernia pozioma VL2, C6 – Wieters 1, C7–C9 – prasa 3, C10 – pakowanie 3, C11 – korekcja, SUR, C12–C14 – prasa 2, C15 – pakowanie 2, C16 – Wieters 2, C17 – magazyn SUR, C17–C19 – prasa 1, C20 – pakowanie 1, Hala D: D1 – CNC, D2 – strefa przyjęć na systemy,	

D3 – pakowanie, magazyn Extrusion, Hala E: E1 – zagniatanie MULLER-Y, E2 – zagniatanie ISOMAT-Y, E3 – magazyn, Hala F: Magazyn, budynek socjalno-biurowy, Hala G: G1 – magazyn anodowni, G2 – obróbka mechaniczna, magazyn, G3 – oczyszczalnia, G4 – pakowanie, magazyn anodowni, G5 – pomieszczenie socjalno-biurowe, G6 – linia anodowania, Hala H: H1 – magazyn, budynek socjalno-biurowy, H2 – dział systemów osłonowych, pergole, H3 – magazyn tworzyw, H4 – pomieszczenia socjalno-biurowe, H5 – pakowanie 4, H6 – ekstruzja tworzyw sztucznych, H7 – pomieszczenie nadzoru, H8–H9 – prasa 4, Hala I: Magazyn, Hala J: Budynek produkcyjno-magazynowy i socjalno-biurowy, Portiernia 1, Portiernia 2	120
Rys. 3. Uproszczony schemat procesów logistycznych Grupy Aliplast.....	121
Rys. 4. Rysunek poglądowy przedstawiający strefy pakowania	122
Rys. 5. Trasa przejazdu samochodów ciężarowych do magazynu surowców	122
Rys. 6. Propozycja umiejscowienia pakowania centralnego.....	124
Rys. 7. Propozycja umiejscowienia magazynu wyrobów gotowych i drogi przejazdowej.....	125
Rys. 8. Rozmieszczenie infrastruktury magazynu wyrobów gotowych.....	126
Rys. 9. Propozycja umiejscowienia magazynu materiałów pomocniczych.....	126
Rys. 10. Działka granicząca z magazynem surowców Grupy Aliplast.....	127
Rys. 11. Propozycja zmiany ustawienia wagi samochodów ciężarowych	128
Rys. 12. Propozycja umieszczenia miejsca załadunku/rozładunku	129

Analiza naprężenia oraz ciśnienia

podczas przemieszczania się leja względem kikuta

Rys. 1. a) model CAD połączenia lej–kikut: 1 – lej, 2 – kość, 3 – mięśnie, 4 – skóra, b) dystalna część kości udowej użyta w modelu.....	135
Rys. 2. Warunki brzegowe badań numerycznych: a) układ współrzędnych dla podpory ruchomej, b) przemieszczenie leja względem kikuta	137
Rys. 3. Porównanie badanych parametrów uzyskanych ze wszystkich wariantów obliczeń	138
Rys. 4a. Mapy naprężenia HMH oraz ciśnienia przedstawione dla badanych modeli (bez przemieszczenia leja) w przypadku zastosowania trzech różnych materiałów	139
Rys. 4b. Mapy naprężenia HMH oraz ciśnienia przedstawione dla badanych modeli (z przemieszczeniem leja) w przypadku zastosowania trzech różnych materiałów	140

Tajniki smaku. Część 1: Analiza tekstury przekąsek

Rys. 1. Urządzenie do badania tekstury: 1 – kontroler z wyłącznikiem, 2 – platforma pomiarowa, 3 – przyrząd pomiarowy, 4 – ogniwo obciążnikowe, 5 – suwnica.....	147
Rys. 2. Zestaw do badania siły ściskającej chipsy i orzeszki	148
Rys. 3. Poziom twardości krakersów K1	149
Rys. 4. Poziom twardości krakersów K2	149

Rys. 5. Kruchość krakersów K1	150
Rys. 6. Kruchość krakersów K2	150
Rys. 7. Średnia twardość krakersów K1 i K2	151
Rys. 8. Średnia kruchość krakersów K1 i K2	151
Rys. 9. Siła niszcząca orzech dla próby O1	152
Rys. 10. Siła niszcząca orzech dla próby O2	152
Rys. 11. Siła niszcząca panierkę dla próby O1	153
Rys. 12. Siła niszcząca panierkę dla próby O2	153
Rys. 13. Średnia wartość siły niszczącej orzech i panierkę O1 i O2	154
Rys. 14. Kruchość chipsów C1	155
Rys. 15. Kruchość chipsów C2	155
Rys. 16. Średnia kruchość chipsów C1 i C2	156
Rys. 17. Chrupkość chipsów C1	156
Rys. 18. Liczba pików chrupkości chipsów C1	157
Rys. 19. Chrupkość chipsów C2	157
Rys. 20. Liczba pików chrupkości chipsów C2	157
Rys. 21. Średnia chrupkość i liczba pików chrupkości chipsów C1 i C2	158

Tajniki smaku. Część 2: Analiza jakości miodów

Rys. 1. Aparat AQUA LAB: a) schemat aparatu, b) widok aparatu	163
Rys. 2. Badane miody: a) miody w opakowaniach b) miód 1 – pochodzący z własnej pasieki, c) miód 2 – mieszanka miodów pochodzących z UE, d) miód 3 – zakupiony od właściciela pasieki na Podlasiu	164
Rys. 3. Liczba diastazowa (zawartość enzymów) w badanych miodach	165
Rys. 4. Zawartość proliny w badanych miodach	166
Rys. 5. Zawartość HMF w badanych miodach	167
Rys. 6. Pyłki zidentyfikowane w miodzie 1: a) ostrożeń polny, b) akacja, c) lipa	167
Rys. 7. Pyłki zidentyfikowane w miodzie 2: a) akacja, b) cytrus, c) gryka	167
Rys. 8. Zidentyfikowane pyłki rzepaku, w przeważającej ilości, w miodzie 3	168

Ocena potencjału terapeutycznego koniugatów glicydylowanych dendrymerów PAMAM generacji czwartej z lapatynibem, fulwestrantem i/lub paklitakselem w chorobach nowotworowych i pasożytniczych

Rys. 1. Schemat koniugatów dendrymeru PAMAM G4 z paklitakselem (c), fulwestrantem (b) i/lub lapatynibem (a) opłaszczony R-glicydołem (d, e). G4P-(G4 ^{*4P109gl}), G4F-(G4 ^{*13L85gl}), G4L-(G4 ^{*13L85gl}), G4PF-(G4 ^{*4P10F98gl}), G4PL-(G4 ^{*4P10L98gl}) i G4PFL-(G4 ^{*4P11F11P74gl}). Symbol * oznacza znakowanie resztą FITC	174
Rys 2a. Krzywe Kaplana–Meiera dla <i>C. elegans</i> po 7-dniowej inkubacji z G4P, G4F, G4L, i G4PFL. Wyniki zaprezentowano jako odsetek żywych osobników. Istotnie statystyczne różnice wobec traktowanej DMSO kontroli oznaczono za pomocą testu Gehana Wilcoxa i oznaczono symbolem *	179

Rys 2b. Krzywe Kaplana–Meiera dla <i>C. elegans</i> po 7-dniowej inkubacji z G4P, G4F, G4L, i G4PFL. Wyniki zaprezentowano jako odsetek żywych osobników. Istotnie statystyczne różnice wobec traktowanej DMSO kontroli oznaczono za pomocą testu Gehana Wilcozona i oznaczono symbolem *	180
---	-----

Badanie użyteczności Cyfrowej Platformy Zdrowia Młodzieży

Rys. 1. Przykładowy raport zgłaszania błędu.....	188
Rys. 2. Przykładowy raport błędu	189
Rys. 3. Przykładowe przebiegi wysyłania i odbioru danych, utraty odebranych pakietów i poziomu buforowania danych dla czterech przeglądarek: a) Microsoft Edge, b) Mozilla Firefox, c) Google Chrome i d) Opera GX	193

Spis fotografii

System jezdny analogu łazika marsjańskiego

Fot. 1. Wizualizacja płytki UNIRover ECU.....	14
Fot. 2. Panel operatorski.....	14
Fot. 3. Wizualizacja płytki konwertującej sygnały sterujące	16



POLITECHNIKA
LUBELSKA



POLITECHNIKA
RZESZOWSKA
im. IGNACEGO ŁUKASIEWICZA



POLITECHNICZNA SIEĆ
VIA CARPATIA