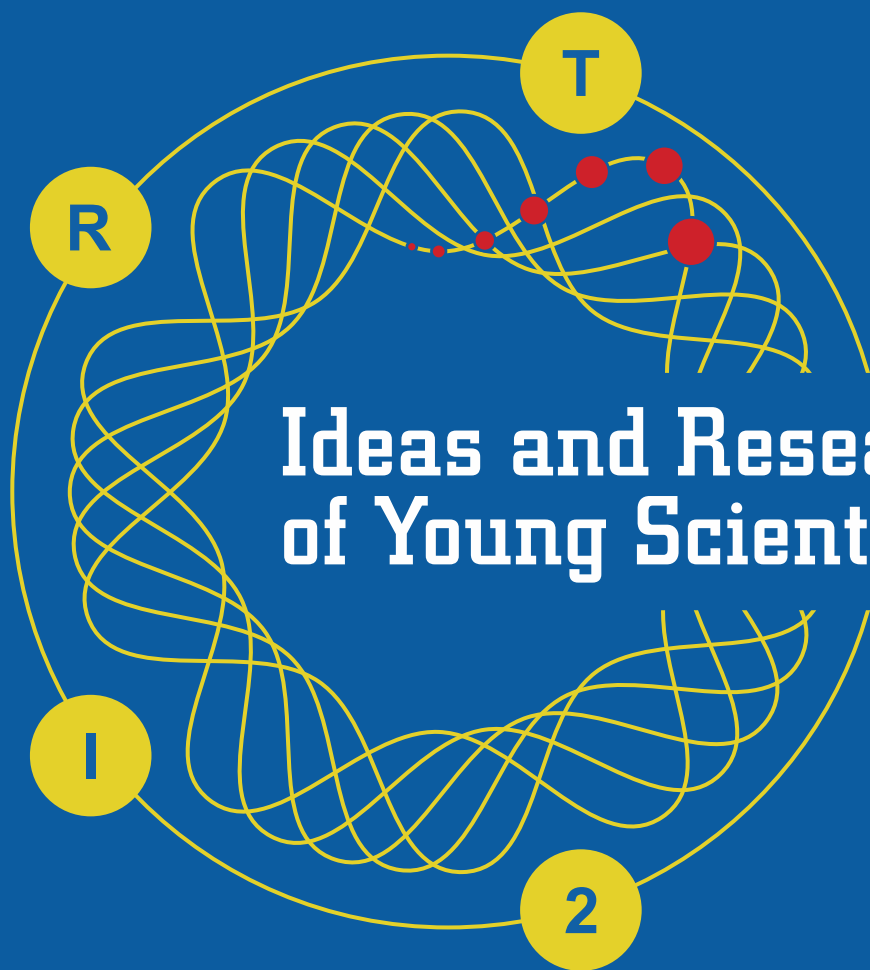




Ideas and Research of Young Scientists

Editor

OLEKSANDR JEWTUSZENKO

Assistant Editor

ADRIANA DOWBYSZ

IDEAS AND RESEARCH OF YOUNG SCIENTISTS

VOL. 2

EDITOR
OLEKSANDR JEWTUSZENKO

ASSISTANT EDITOR
ADRIANA DOWBYSZ



OFICyna WYDAWNICZA POLITECHNIKI BIAŁOSTOCKIEJ
BIAŁYSTOK 2025

Recenzenci:
prof. dr hab. Taras Nahirnyy
prof. dr hab. inż. Dorota Stadnicka

Redakcja i korekta językowa:
Katarzyna Duniewska
Aniela Staszewska

Skład, grafika i okładka:
Marcin Dominów



Skład niniejszej monografii stanowią publikacje pokonferencyjne
przygotowane przez uczestników konferencji
2nd International Young Researchers Conference: Ideas, Research, Training,
która odbyła się w dn. 24–26.06.2025 r. w Politechnice Białostockiej.

© Copyright by Politechnika Białostocka, Białystok 2025

ISBN 978-83-68673-01-2
ISBN 978-83-68673-02-9 (e-Book)
DOI: 10.24427/978-83-68673-02-9



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.

Druk: Agencja Reklamowa TOP Agnieszka Łuczak
Oficyna Wydawnicza Politechniki Białostockiej
ul. Wiejska 45C, 15-351 Białystok
www.pb.edu.pl

Spis treści

WSTĘP	7
AUTOMATYKA, ELEKTRONIKA, ELEKTROTECHNIKA I TECHNOLOGIE KOSMICZNE	
Pole switching in state-feedback control systems <i>Paweł Kieczmerski</i>	9
Empirical optimal method for Lyapunov function synthesis of Fractional-Order Systems <i>Dawid Ostaszewicz</i>	25
Zastosowanie uczenia maszynowego w lokalizacji wewnątrzbudynkowej z wykorzystaniem wskaźnika RSSI <i>Mateusz Sumorek</i>	39
INFORMATYKA TECHNICZNA I TELEKOMUNIKACJA	
Deepfakes in contemporary information warfare: Regulatory challenges and implications for global security <i>Kinga Niemiec</i>	53
INŻYNIERIA BIOMEDYCZNA	
Design and 3D printing of biodegradable scaffolds from PLA based material <i>Tomáš Balint, Miroslav Kohan, Jozef Živčák, Radovan Hudák</i>	61
Comparative study of conventional and stimuli-responsive hydrogels for bioprinting <i>Mária Danko, Jana Hlubeňová, Radovan Hudák, Jozef Živčák</i>	69
INŻYNIERIA LĄDOWA, GEODEZJA I TRANSPORT	
Behaviour of sand-gravel mixture in direct shear <i>Kolawole Kazeem</i>	81
The role of international initiatives in enhancing biodiversity protection in rail transport <i>Julia Milewicz, Tomasz Nowakowski, Grzegorz M. Szymański</i>	93

INŻYNIERIA MECHANICZNA

The impact of tire profile height and pressure on driver seat vibrations and the degree of tire grip on the road surface <i>Adam Kamiński</i>	103
Climate-smart farming with mobile agrivoltaics: A Polish Case Study on Soybean and Buckwheat under Field Conditions <i>Michał Kiedrowski, Anna Wenda-Piesik</i>	119

INŻYNIERIA ŚRODOWISKA, GÓRNICtwo I ENERGETYKA

Pomiar entalpii przepływającego medium <i>Leszek Bargłowski, Mariusz Adamski</i>	131
Life Cycle Assessment (LCA) of glass/polyester laminates in laboratory-scale testing <i>Adriana Dowbysz, Mariola Samsonowicz, Bożena Kukfisz</i>	141
Impact of ultraviolet radiation on skin cell redox balance and Phenolic-Based Photoprotection Strategies <i>Ewelina Gołębiewska, Monika Kalinowska, Marcin Zieliński, Marek Pruszyński</i>	151
Związki fenolowe i ich zastosowanie w przemyśle <i>Maciej Kozłowski, Monika Kalinowska</i>	161

NAUKI O ZARZĄDZANIU I JAKOŚCI

Internacjonalizacja przedsiębiorstw z branży <i>automotive</i> w Polsce oczami pracowników <i>Marta Czernecki-Wilczyńska</i>	171
Polityka celna jako narzędzie wspierania lokalnej przedsiębiorczości – analiza protekcjonizmu rolnego na przykładzie Polski w ramach UE <i>Ewelina Mazewska</i>	179
Nowoczesne technologie w edukacji zawodowej – perspektywa uczniów kierunków elektroniczno-mechatronicznych <i>Andrzej Polecki, Ewa Chodakowska</i>	189
Wdrażanie Celów Zrównoważonego Rozwoju w strategiach polskich uczelni wyższych <i>Agnieszka Sakowicz</i>	205
Bariery techniczne, ekonomiczne i organizacyjne w zarządzaniu energią elektryczną <i>Honorata Sierocka</i>	215

Application of artificial intelligence in Intelligent Transport Systems – selected examples <i>Natalia Sturgulewska</i>	223
Implementing automation in distribution centers: a review of case studies <i>Wojciech Tarasiuk</i>	233
Parki naukowo-technologiczne – przegląd metod oceny oraz propozycja wskaźników ewaluacyjnych <i>Bartłomiej Użyński</i>	241
Metoda teorii ugruntowanej w badaniach z zakresu logistyki i zarządzania łańcuchem dostaw <i>Martyna Wilczewska</i>	251
Spis tabel.....	265
Spis rysunków.....	269

Wstęp

W dniach 24–26 czerwca 2025 r. na Wydziale Mechanicznym Politechniki Białostockiej (PB) odbyła się II Międzynarodowa Konferencja Młodych Naukowców: *Ideas, Research, Training (IRT)*. W wydarzeniu uczestniczyło ponad 50 młodych badaczy z Polski (m.in. z Politechniki Białostockiej, Politechniki Bydgoskiej, Politechniki Poznańskiej, Politechniki Rzeszowskiej, Politechniki Śląskiej, Politechniki Wrocławskiej, Akademii Łomżyńskiej, Uniwersytetu w Białymstoku oraz Uniwersytetu Mikołaja Kopernika w Toruniu) oraz z Technicznego Uniwersytetu w Koszycach (Słowacja). Organizatorami Konferencji byli Samorząd Doktorantów PB, Szkoła Doktorska PB oraz Porozumienie Doktorantów Uczelni Technicznych. Patronat honorowy objęli Jej Magnificencja Rektor PB, Prezydent Miasta Białegostoku i Marszałek Województwa Podlaskiego.

Niniejsza monografia zawiera wybrane rozwinięte wersje referatów i posterów przedstawionych podczas sesji konferencyjnych. Rozdziały zostały uporządkowane tematycznie, tak aby ukazać ciągłość problemową i przegląd aktualnych trendów badawczych w dyscyplinach naukowych: automatyka, elektronika, elektrotechnika i technologie kosmiczne, informatyka techniczna i telekomunikacja, inżynieria lądowa, geodezja i transport, inżynieria biomedyczna, inżynieria mechaniczna, inżynieria środowiska, górnictwo i energetyka oraz nauki o zarządzaniu i jakości. Taki układ ma ułatwić Czytelnikowi lekturę: od ujęć metodycznych i modelowych, przez studia przypadków i wyniki eksperymentalne, po propozycje rozwiązań dla przemysłu i administracji.

Monografia nie powstałaby bez wsparcia wielu osób zarówno ze środowiska akademickiego, jak i spośród pracowników Oficyny Wydawniczej PB. Ich pomoc i nieustające wsparcie stanowiły fundament powstania tej publikacji. Z tego miejsca pragniemy wyrazić naszą wdzięczność wszystkim, którzy pomogli nam zarówno podczas opracowywania monografii, jak i całego procesu wydawniczego. Szczególne podziękowania pragniemy skierować do Recenzentów: prof. dr. hab. Tarasa Nahirnyyego oraz prof. dr hab. inż. Doroty Stadnickiej. Ich nieocenione uwagi merytoryczne, cierpliwość oraz wieloletnie doświadczenie stanowiły kluczowe elementy powstania ostatecznej wersji monografii.

Wyrażamy także szczerze podziękowania dla redaktorów Oficyny Wydawniczej PB, Pani mgr Katarzyny Duniewskiej i Pana mgr. Marcina Dominowa. To właśnie dzięki ich wysokiemu profesjonalizmowi i umiejętnościom powstał produkt końcowy w postaci tej monografii.

Przeprowadzenie konferencji nie byłoby możliwe bez wsparcia finansowego MNiSW w ramach zadania „Politechniczna Sieć Via Carpatia im. Prezydenta RP Lecha Kaczyńskiego”. Serdeczne podziękowania kierujemy także do prof. Joanny Ejdys, prof. Michała Kucieja i dr hab. Jolanty Piekut, prof. PB za dodatkowe wsparcie finansowe oraz życzliwość organizacyjną, które umożliwiły realizację konferencji na wysokim poziomie. Monografię przygotowano i opublikowano dzięki uprzejmości Szkoły Doktorskiej Politechniki Białostockiej, która pokryła koszty wydawnicze, za co organizatorzy konferencji serdecznie dziękują.

*Oleksandr Jewtuszenko
Adriana Dowbysz*

Pole switching in state-feedback control systems

Paweł Kieczmerski

Department of Automatic Control and Robotics

Białystok University of Technology

pawel.kieczmerski@pb.edu.pl

Abstract: This paper explores pole switching state-feedback control. A new structure is proposed where the values of the gain matrix K in the state-feedback loop are switched. This approach allows for the shifting of the system's poles, thereby altering its dynamics. The operation of such a structure was investigated. Simulation tests demonstrated that, after switching, the system retained favorable characteristics from both considered configurations. The method was implemented on a QUBE Servo inverted pendulum using an NI-myRIO-1900 and Matlab with QUARC. Experimental results matched simulations and confirmed the advantages of the proposed approach.

Key words: switched systems, feedback switching, pole switching, control, implementation

1. Introduction

With technological advancements, commonly used devices are becoming increasingly complex, often exhibiting nonlinear dynamics that challenge traditional control methods. Advanced techniques like optimization or model predictive control are commonly used to manage such systems, but they can be difficult to implement. However, there is an alternative in the form of switched systems that allows the control method or control structure to be changed relative to a given time, state-variable or can be event-triggered. Switched systems enable the development of control algorithms tailored to specific operating ranges, allowing the seamless integration of different control methods under different area of operation. This approach also grants more control over system responses to meet desired regulation criteria more effectively.

More and more attention is being paid to switched systems, as reflected in the growing number of publications on these hybrid systems. The main emphasis in the literature, however, is on the stability of these systems [1, 2], methods for determining the switching function [3] or the application of switched systems theory within the framework of modeling the dynamics of control plants [4, 5]. On the other hand, the number of studies on the practical implementation of switched systems in control applications remains relatively limited. One can find works investigating various switching strategies such as hysteresis switching [6], hard-switching [7, 8], optimal switching [9, 10], predictive switching [11, 12], bump limitation switching [13] or fuzzy-dependent switching [14]. The aforementioned

works demonstrate the validity of using switched system theory to control nonlinear systems and include various approaches to their implementation. Switching primarily focuses on the sequential use of different controllers, but system behavior can also be influenced by shifting its poles – a concept that has yet to be thoroughly explored.

Modal control refers to the process of shifting a system's poles, enabling the shaping of its dynamics by placing the closed-loop poles in desired locations. By selecting feedback gains for specific pole placement, it achieves targets like fast settling, low overshoot, and robustness.

The purpose of this article is to present a new switched control structure in which the switching element is a gain matrix within a state-feedback loop, enabling the shifting of system poles. Theoretical analyses will be provided, followed by validation through simulations and final implementation on a physical system – Quancer's QUBE Servo inverted pendulum.

The paper is structured as follows: Section 2 presents the theory related to switched systems, where a state-space model with consideration of a switching matrix K within a state-feedback loop will be presented. Section 3 will address the identification of the control plant for the nonlinear QUBE Servo inverted pendulum system. Section 4 presents model verification and switching simulation results, where two sets of K matrices and their effect on system performance are considered. Section 5 presents the practical implementation of the switching algorithm developed in Section 4, using the NI-myRIO-1900 measurement board with an FPGA module, MATLAB Simulink, and QUARC software, followed by a presentation of the results.

2. Switched systems

A state-space model is a mathematical tool for representing the dynamics of any system. The model can have multiple inputs, outputs and variables, which are related to one another through first-order differential equations. In general, the linear state-space model is described by the equations:

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t), \quad (1a)$$

$$y(t) = Cx(t) + Du(t), \quad (1b)$$

where:

A – state matrix,

B – input matrix,

C – output matrix,

D – transmission matrix, $x(t)$ – vector of state variables, $u(t)$ – vector of input signals.

By utilizing equations (1), the structure depicted in Figure 1 can be constructed, representing the model of the control plant.

The poles of the system (1) are found as the roots of the characteristic equation, defined by the following:

$$|sI - A| = 0. \quad (2)$$

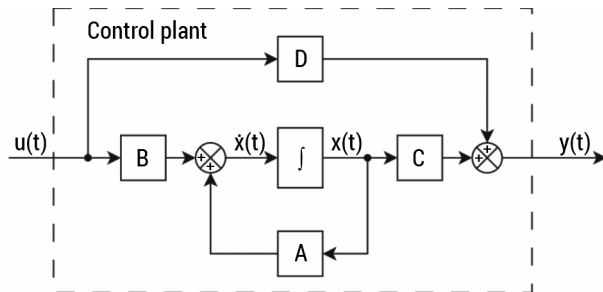


Figure 1. General structure of state-space model

Source: own studies.

The system (1) is stable if, for continuous systems, all its poles lie in the open left half-plane of the complex plane. The stability regions are depicted in Figure 2.

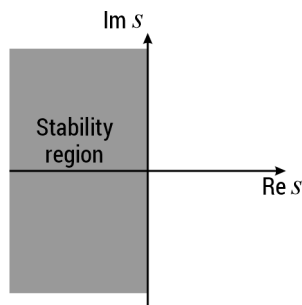


Figure 2. Stability regions of continuous system

Source: own studies.

The position of the system's poles determines not only stability but also its dynamic properties, such as rise time, settling time, and transient oscillations. Consequently, altering pole positions can modify the system's dynamics – a process that is often desirable in control design. For this purpose, the pole-placement method is used, enabling changes in pole locations through the introduction of a state-feedback loop with a gain matrix K . The control law is therefore expressed as $u(t) = -Kx(t)$. Then system (1) is as follows:

$$\dot{x}(t) = (A - BK)x(t) + Br(t), \quad (3a)$$

$$y(t) = (C - DK)x(t) + Dr(t), \quad (3b)$$

where $r(t)$ is a new reference signal for the system with state-feedback loop.

The matrix K can be calculated using methods such as the algebraic Riccati equation or Ackermann's formula for desired poles position [15].

A switched system is a type of hybrid system that integrates continuous dynamics with discrete events. It consists of several subsystems and a decision unit that selects the active subsystem at any given time. In contrast to general hybrid systems, switched systems do not account for specific discrete dynamics but rather emphasize all potential switching sequences. The control signal that decides which subsystem to activate is referred to as the switching function denoted by $\sigma(t)$. In this paper, the switching will involve the gain matrix K , so that the locations of the system poles will be shifted.

Lets consider a switched state-feedback control system, where the gain matrix K is switched:

$$\dot{x}(t) = [A - BK(\sigma)]x(t) + Br(t), \quad (4a)$$

$$y(t) = [C - DK(\sigma)]x(t) + Dr(t), \quad (4b)$$

The general structure of system (4) is shown in Figure 3.

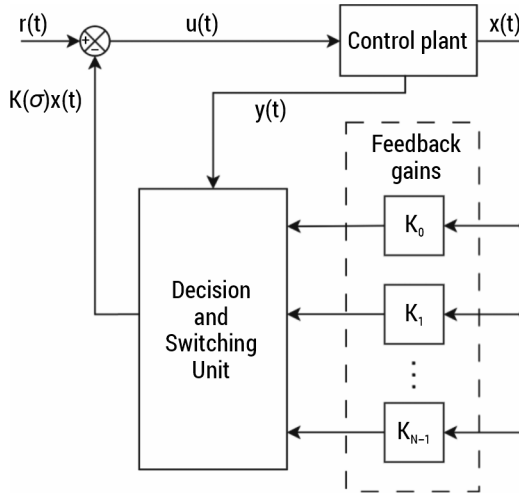


Figure 3. General structure of switching state-feedback gain system

Source: own studies

The gain matrix K depends entirely on switching signal $\sigma(t) \in \mathbb{N}$ and can be expressed as:

$$K(\sigma) = \begin{cases} K_0 & : \sigma = 0, \\ K_1 & : \sigma = 1, \\ \vdots & \vdots \\ K_{N-1} & : \sigma = N - 1. \end{cases} \quad (5)$$

In this system, the gain matrix K takes only one value at a time from a set of possible values. Therefore, equation (5) can be expressed as a particular case of convex systems (e.g., a convex linear function). This strategy can be named convex hard-switching, resulting in the following:

$$K(\sigma) = K_0(\sigma) + K_1(\sigma) + \dots + K_{N-1}(\sigma). \quad (6)$$

For two sets of gain matrix K , $\sigma = \{0, 1\}$ we have:

$$K(\sigma) = K_0(1 - \sigma) + K_1(\sigma). \quad (7)$$

For three sets of gain matrix K , $\sigma = \{0, 1, 2\}$ we have:

$$K(\sigma) = K_0(1 - \sigma) \left(1 - \frac{\sigma}{2}\right) + K_1(\sigma)(2 - \sigma) + K_2\left(\frac{\sigma}{2}\right)(\sigma - 1). \quad (8)$$

By analyzing equation (6) across multiple cases, a discernible pattern emerges, enabling the derivation of a general equation using Lagrange interpolation. For N sets of gain matrix K with $\sigma = \{0, 1, 2, \dots, N - 1\}$, equation (6) will take the form:

$$K(\sigma) = \sum_{k=0}^{N-1} K_k \prod_{\substack{m=0 \\ m \neq k}}^{N-1} \left(\frac{\sigma - m}{k - m} \right). \quad (9)$$

In general, meeting the stability condition, shown in Figure 2, for each subsystem is not sufficient to guarantee the stability of the switched system (4), due to the influence of switching signal. However, in the cases considered later in this article, switching between the different subsystems will be relatively infrequent, hence it can be assumed that the stability condition will be met as long as each subsystem is stable.

3. Model identification

The subject of the identification is the QUBE Servo inverted pendulum, shown in Figure 4. This device is equipped with a DC brush motor, two encoders, a data acquisition card and an amplifier. The input of the system is the torque generated by the servo at the base of the rotary arm. The outputs of the system are the rotation angle of the rotary arm θ and the swing angle of the pendulum arm α , whereby $\alpha = 0$ indicates the vertical position.

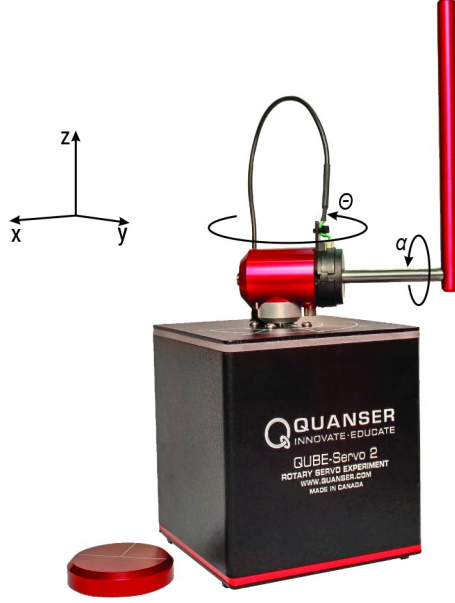


Figure 4. Inverted pendulum QUBE Servo

Source: created based on [16].

Modeling begins with an analysis of kinetic and potential energy in the context of rotational motion, assuming no friction. The kinetic energy of the system consists of two components: the horizontal motion of the rotating rod and the vertical motion of the pendulum. The energy of the pendulum considers its moment of inertia and momentum, taking into account the position of the center of mass in the coordinate system x, y, z . In turn, the potential energy of the system is due only to the gravitational force acting on the pendulum. Based on the Lagrange equation, a nonlinear model of the system was obtained:

$$(J_r + J_p + m_p l_{ps}^2) \ddot{\theta} + m_p L_r l_{ps} \cos \alpha \ddot{\alpha} - m_p L_r l_{ps} \sin \alpha \dot{\alpha}^2 + 2 m_p l_{ps}^2 \sin \alpha \cos \alpha \dot{\theta} \dot{\alpha} = \tau - d_r \dot{\theta} \quad (10a)$$

$$(J_p + m_p l_{ps}^2) \ddot{\alpha} + m_p L_r l_{ps} \cos \alpha \ddot{\theta} + m_p g l_{ps} \sin \alpha - \frac{1}{2} m_p L_r l_{ps}^2 \sin \alpha \dot{\theta} \dot{\alpha} = -d_p \dot{\alpha} \quad (10b)$$

Where:

- θ – rotational arm angle,
- α – pendulum angle,
- $\dot{\theta}$ – rotational arm angular velocity,

- $\dot{\alpha}$ – pendulum angular velocity,
- m_p – pendulum mass,
- d_r – rotational arm viscous damping coefficient,
- d_p – pendulum viscous damping coefficient,
- L_p – pendulum length,
- $l_{ps} = \frac{L_p}{2}$ – pendulum center of mass,
- L_r – rotational arm length,
- J_t – total moment of inertia,
- J_r – rotational arm moment of inertia,
- J_p – pendulum moment of inertia,
- g – gravitational acceleration, τ – motor torque.

Assuming the system is in a steady-state equilibrium $\dot{\theta}, \dot{\alpha} = 0$, and operates near the upright position with $\theta, \alpha \approx 0$, the linearized equations can be derived using a Taylor series expansion:

$$(J_r + J_p + m_p l_{ps}^2) \ddot{\theta} + m_p L_r l_{ps} \ddot{\alpha} = \tau - d_r \dot{\theta}, \quad (11a)$$

$$(J_p + m_p l_{ps}^2) \ddot{\alpha} + m_p L_r l_{ps} \ddot{\theta} + m_p g l_{ps} \alpha = -d_p \dot{\alpha}. \quad (11a)$$

Assuming the state vector $x(t) = [\theta \ \alpha \ \dot{\theta} \ \dot{\alpha}]^T$, and all state variables are available at the output of the system, the state matrices of the model (1) of (11) are as follows:

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & \frac{m_p^2 l_{ps}^2 L_r g}{J_t} & -\frac{d_r (J_p + m_p l_{ps}^2)}{J_t} & -\frac{m_p l_{ps} L_r d_p}{J_t} \\ 0 & \frac{m_p g l_{ps} (J_r + m_p L_r^2)}{J_t} & -\frac{m_p l_{ps} L_r d_r}{J_t} & \frac{d_p (J_r + m_p L_r^2)}{J_t} \end{bmatrix}, \quad (12a)$$

$$B = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \frac{J_p + m_p l_{ps}^2}{J_t} \\ \frac{m_p l_{ps} L_r}{J_t} \end{bmatrix}, \quad (12b)$$

$$C = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (12c)$$

$$D = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad (12d)$$

$$J_t = J_p^2 + J_p J_r + 2J_p m_p l_{ps}^2 + J_r m_p l_{ps}^2 + m_p^2 l_{ps}^4 - m_p^2 L_r^2 l_{ps}^2 \quad (12e)$$

Next, the dynamics of the DC brushed motor must be taken into account. The torque generated by the motor can be described as:

$$\tau = \frac{k_t}{R_m} (v_m - k_t \dot{\theta}) = \frac{k_t}{R_m} v_m - \frac{k_t^2}{R_m} \dot{\theta}, \quad (13)$$

where:

R_m – the motor resistance,

k_t – the motor constant

v_m – the input voltage.

Therefore, it is necessary to modify two elements in the third column of matrix (12a) related to $\dot{\theta}$, and the entire input matrix (12b), resulting in:

$$B_{DC} = \frac{k_t}{R_m} B \quad (14a)$$

$$A(3,3)_{DC} = A(3,3) - \frac{k_t^2}{R_m} B(3,1) \quad (14b)$$

$$A(4,3)_{DC} = A(4,3) - \frac{k_t^2}{R_m} B(4,1) \quad (14c)$$

After substituting the values of each parameter, obtained from Quanser QUBE Servo technical specifications [16], the final result was as follows:

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 26.1584 & -3.0531 & -0.0861 \\ 0 & 79.9566 & -1.7244 & -0.2633 \end{bmatrix}, \quad (15a)$$

$$B = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 15.2496 \\ 8.6127 \end{bmatrix}, \quad (15b)$$

$$C = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (15c)$$

$$D = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}. \quad (15d)$$

4. Simulation results

4.1. Model verification

The model developed in Section 3 was implemented into Matlab Simulink for verification purposes. The inverted pendulum model (15) exhibits inherent instability. Hence, in order to compare the developed model with real control plant, it must first be stabilized. This goal was accomplished by using the pole-placement method described in section 2, making the system take the form (3). The gain matrix K was computed using Ackermann's formula and resulted in the following values:

$$K = [-1 \quad 53.1227 \quad -1.5418 \quad 6.3538]. \quad (16)$$

A rectangular waveform with an amplitude of 20° and a period of 20 seconds was then applied to both the simulation and the real control plant. The responses obtained for each of the considered state variables are shown in Figure 5.

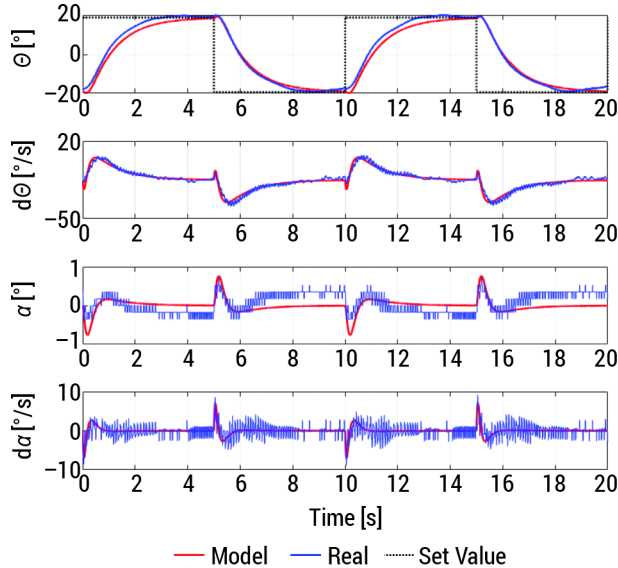


Figure 5. Comparison of developed model with real control plant

Source: own studies.

The comparison presented in Figure 5 indicates that the developed model closely reproduces the dynamic behavior of the real system. The observed discrepancies

are minimal and primarily noticeable in the trajectory of the pendulum angle α . These deviations are attributed to the limited resolution of the encoder, which measures approximately 5.69 pulses per degree, particularly affecting the accuracy of small angle measurements. Overall, the results confirm the high fidelity of the model in reflecting the system's physical properties.

4.2. Switching simulation

The established model enables a simulation-based analysis of how the implemented switching strategies affect the control object's performance, eliminating the risk of potential damage. The switching algorithm is assumed to provide:

- stability of the system,
- accuracy relative to the setpoint value,
- fast response of the system.

Hence, it is necessary to select a set of gain matrices K that provides the above properties. For this purpose, two sets of K matrices were determined. Matrices K_A and K_B were used and they took on values:

$$K_A = [-0.7847 \quad 26.3268 \quad -0.7571 \quad 2.6971], \quad (17)$$

$$K_B = [-1 \quad 53.1227 \quad -1.5418 \quad 6.3538].$$

The first matrix ensures a fast response to input changes (fast rising time), while the second, previously used for model verification, provides system gain equal to one. The pole values of the original model and the poles obtained by applying the aforementioned matrices are shown in Figure 6 but also listed in Table 1.

Table 1. System poles for different feedback loops

Pole index	Original model	Model with K_A	Model with K_B
1	0	$-3.0000 + 0.0000i$	$-19.5924 + 0.0000i$
2	8.5983	$-4.0000 + 7.0000i$	$-6.9761 + 1.7090i$
3	-9.4709	$-4.0000 - 7.0000i$	$-6.9761 - 1.7090i$
4	-2.4438	$-4.0000 + 0.0000i$	$-0.9835 + 0.0000i$

Source: own studies.

By comparing Figure 6 with Figure 2 it can be concluded that the proposed subsystems are stable. The model (4) with matrices (14) was implemented in Simulink with gain matrices K_A and K_B . The switching signal σ takes a value of 1 when the value of θ lies within $\pm 30\%$ of the setpoint, and a value of 0 when it falls outside this range. A rectangular waveform with an amplitude of 20° and a period of 20 seconds was applied to the input of the prepared system.

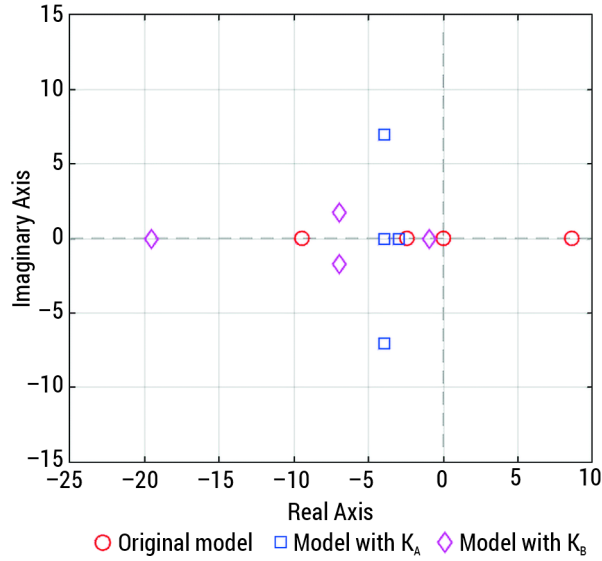


Figure 6. The location of system poles for all studied cases

Source: own studies.

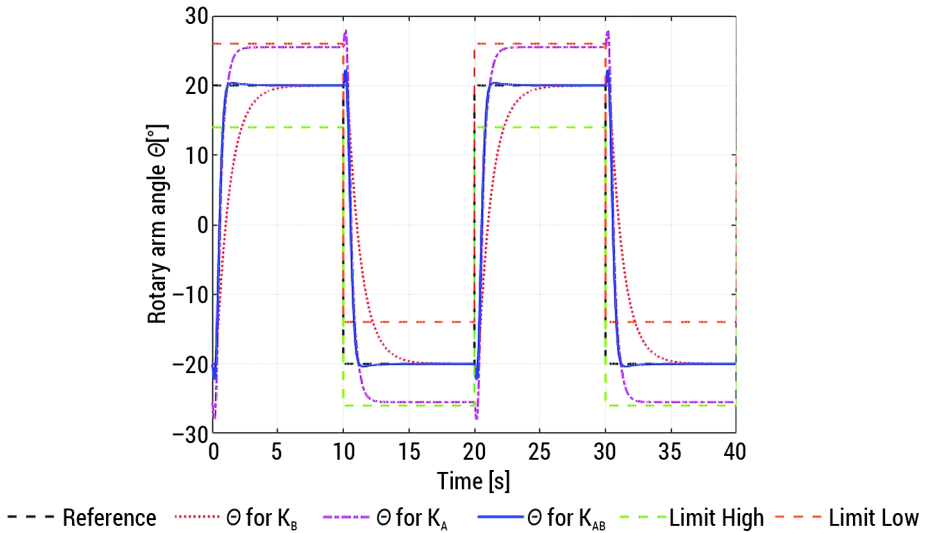


Figure 7. Comparison of the responses of the system with K_A , K_B , and the switched system K_{AB}

Source: own studies.

The responses of the system with matrix K_A , matrix K_B and switched system denoted by K_{AB} are presented in Figure 7. In Figure 7, it can be seen that the response of the switched system increases at the speed of the K_A system, while maintaining a gain equal to 1 as in the K_B system, which means that it meets the predetermined

conditions. Through the use of the switched systems, it was therefore possible to obtain the positive characteristics of both the system with K_A and K_B , confirming the validity of using this type of system in control algorithms.

5. Experimental results

The hardware part for handling switching algorithms was realized using an NI-myRIO-1900 measurement board, which is fully compatible with the QUBE Servo system. MyRIO acts as a target, where all measurements and calculations related to the implementation of control were performed. The program code was implemented using the Matlab Simulink environment, which allowed a smooth transition from simulation algorithms to control of the real control plant. Matlab compiled the code into VHDL form, while the QUARC software enabled synthesis in the FPGA module of the myRIO. The function blocks used to configure the input/output ports and data acquisition are shown in Figure 8.

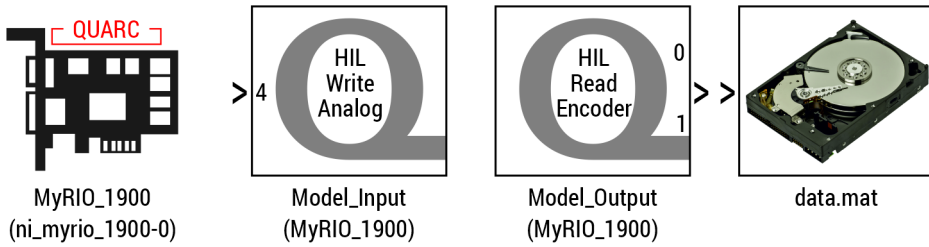


Figure 8. QUARC library configuration blocks

Source: own studies.

The HIL Initialize block is responsible for hardware configuration, enabling the user to set system parameters such as the number of inputs/outputs for general ports or encoders, channel assignments, measurement ranges, and encoder inputs. Following this, other blocks handle analog input/output operations. Additionally, the To Host File block facilitates data logging, allowing for further analysis.

The control algorithm developed in section 4 was implemented into myRIO using Simulink with QUARC software and then tested with the QUBE Servo system with the same conditions and input signal. The comparison of simulation results with experiment results is shown in Figure 9.

The results obtained confirm the feasibility of implementing the pole-switching algorithm in control structures. The system maintained the desired properties defined by the two sets of matrices K_A and K_B – just like in simulation. Note that the switching signal for both simulation and experiment were the same. The slight oscillation of the rotary arm's position around the setpoint is completely normal, as the system primarily prioritizes keeping the pendulum upright. Consequently,

correcting the α angle deviation comes at the expense of the θ angle's accuracy. Additionally, the steady-state deviation of $1-2^\circ$ in θ is attributed to the resolution limitations of the encoders used and can be considered negligible. It is important to note that any deviation in the device's base along the x , y or z axes will influence the pendulum angle α , which in turn will affect the trajectory of the rotating arm's angle θ . This constitutes the primary source of disturbances.

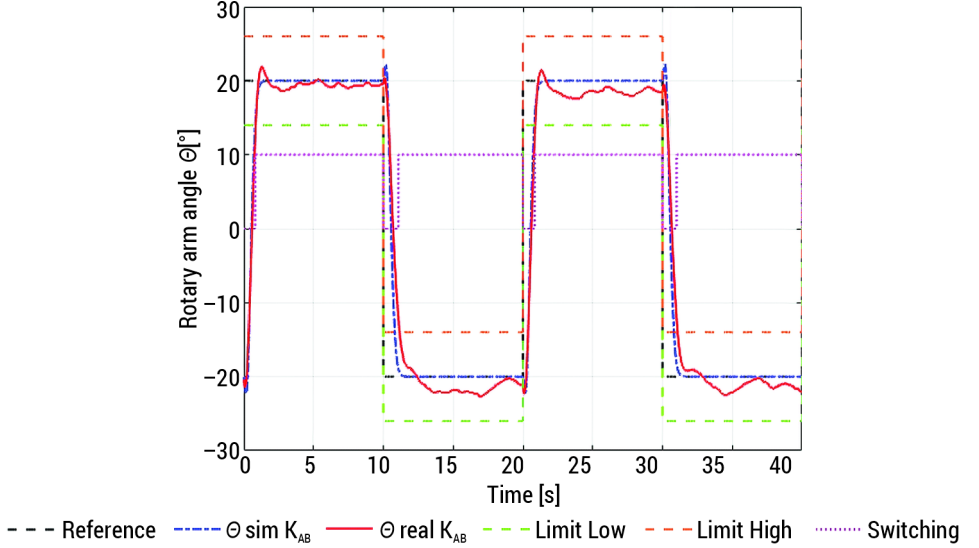


Figure 9. Comparison of simulation K matrix switching and experiment results

Source: own studies.

6. Concluding remarks

This article focuses on presenting a new switched system in the form of a gain matrix K switching algorithm within a state-feedback control framework, as well as demonstrating its implementation in a real, nonlinear control system. This structure, by switching the matrix K , allowed shifting the poles of the control plant, and thus changing its dynamics in a controlled manner. Simulation and experimental results confirmed that pole-switching makes it possible to preserve the positive dynamics characteristics coming from two or more sets of poles, which makes it possible to shape the dynamics of the system almost freely. However, a major challenge with this solution is the difficulty in determining the switching function, as it has a significant impact on system performance. Excessive switching can potentially destabilize the system. In addition, the cases studied include a system whose dynamics is relatively slow, hence additional tests would be required for systems with, for example, an oscillatory nature. Despite this, the solution presented is simple to implement and contains numerous positives, hence it is worth studying.

Acknowledgment

This work was supported by the National Science Centre in Poland under work No. 2022/45/B/ST7/03076 (G/WE-1A/1/2023).

Literature

- [1] Kundu, A., Chatterjee, D., Liberzon, D. (2016). Generalized switching signals for input-to-state stability of switched systems. *Automatica*, 64, 270–277.
- [2] Sun, Z., Ge, S. S. (2011). *Stability theory of switched dynamical systems*. Springer.
- [3] Zhao, X., Kao, Y., Niu, B., Wu, T. (2017). *Control synthesis of switched systems*. Springer.
- [4] Jiang, J., Song, K., Li, Z., Zhu, C., Zhang, Q. (2018). System modeling and switching control strategy of wireless power transfer system. *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, 6(3), 1295–1305.
- [5] Tomaszuk, A., Borawski, K. (2024). A new approach to examine the dynamics of switched-mode step-up DC-DC converters – A switched state-space model. *Energies*, 17(17), 4413.
- [6] Lukic, S. M., Emadi, A. (2010). State-switching control technique for switched reluctance motor drives: Theory and implementation. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 57(9), 2932–2938.
- [7] Singh, S., Sharma, D. K., Kishore, K., Botre, B. A., Akbar, S. A. (2018). Modeling, simulation, and implementation of fast settling switched PI controller for MOX integrated PT microheater. *IEEE Sensors Journal*, 18(20), 8549–8557.
- [8] Cardim, R., Teixeira, M. C. M., Assunção, E., Covacic, M. R., de Seixas, F. J. M., Faria, F. A., Mainardi Júnior, E. I. (2011). Implementation of a DC-DC converter with variable structure control of switched systems. In *2011 IEEE International Electric Machines and Drives Conference (IEMDC)* (pp. 872–877).
- [9] Sun, T., Sun, X.-M., Wang, X.-F., Wang, L. (2020). A novel multidimensional penalty-free approach for constrained optimal control of switched control systems. *International Journal of Robust and Nonlinear Control*, 31(2), 582–608.
- [10] Riedinger, P., Morărescu, I.-C. (2014). A numerical framework for optimal control of switched input affine nonlinear systems subject to path constraint. *Mathematics and Computers in Simulation*, 95, 63–77.
- [11] Bürger, A., Zeile, C., Altmann-Dieses, A., Sager, S., Diehl, M. (2019). Design, implementation and simulation of an MPC algorithm for switched nonlinear systems under combinatorial constraints. *Journal of Process Control*, 81, 15–30.
- [12] Formentini, A., Oliveri, A., Marchesoni, M., Storaice, M. (2017). A switched predictive controller for an electrical powertrain system with backlash. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 32(5), 4036–4047.
- [13] Daafouz, J., Geromel, J., Deaecto, G. (2012). A simple approach for switched control design with control bumps limitation. *Systems and Control Letters*, 61(12), 1215–1220.

- [14] You, Z., Yan, H., Zhang, H., Chen, S., Wang, M. (2021). Fuzzy-dependent-switching control of nonlinear systems with aperiodic sampling. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 29(11), 3349–3359.
- [15] Dodds, S. J. (2015). *Feedback control: Linear, nonlinear and robust techniques and design with industrial applications*. Springer.
- [16] Quanser Inc. (2025). *QUBE Servo User Manual*. <https://www.quanser.com/products/qube-servo>

Empirical optimal method for Lyapunov function synthesis of fractional-order systems

Dawid Ostaszewicz

Department of Automatic Control and Robotics

Faculty of Electrical Engineering

Bialystok University of Technology

dawid1ostaszewicz@gmail.com

Abstract: In the presented paper, a method based on empirical optimization is introduced for the synthesis of Lyapunov functions tailored specifically to systems governed by fractional-order dynamics. Numerical optimization using the simplex algorithm is used to develop Lyapunov functions suitable for systems characterized by fractional dynamics. Simulations conducted with the Fractional-order Modeling and Control toolbox in Simulink confirm the validity and effectiveness of the proposed methodology, with results demonstrating that the function obtained with this method is a positive semi-definite Lyapunov function for fractional-order systems. This method is aligned with the optimal control rules, thus providing a robust and comprehensive framework for fractional-order Lyapunov function synthesis.

Key words: Lyapunov function, fractional-order systems, stability analysis, numerical optimization

1. Introduction

Lyapunov functions are fundamental tools in control theory, widely used to assess the stability of dynamic systems. These functions provide a rigorous mathematical framework for analyzing the stability of a wide range of systems. The construction of an appropriate Lyapunov function can determine the conditions under which a system will converge to a stable equilibrium, ensuring that its long-term behavior remains predictable and safe.

The method is grounded in the concept of energy and the principle of least action, as the Lyapunov function often represents a measure of the system's energy or potential. The decrease of this function over time indicates the dissipation of energy, implying stability. This approach is particularly useful for systems where classical linear stability analysis is insufficient, such as in systems with nonlinear dynamics, time-varying parameters, or fractional-order systems. Thus, Lyapunov's method provides a tool for understanding and designing stable systems [1].

Lyapunov functions for fractional-order systems are discussed in paper [2]. The presented method involves searching for candidate functions among those of fractional order, which presents a fundamental physical challenge. This is because Lyapunov functions are inherently linked to the system's energy and the Hamiltonian. In classical systems, the Hamiltonian is of integer order. Proposed solutions rely on fractional-order functions [3], but such representations do not fully satisfy the requirements of the Lagrangian and Hamiltonian formalism due to the presence of fractional-order partial derivatives with respect to the state-space dimensions.

A major issue arises in interpreting the physical implications of memory effects, which affect both spatial and temporal dimensions. There is currently no strong theoretical or physical justification for employing such operations [4]. From this perspective, the Lyapunov function for a fractional-order system should remain within an integer-order framework to ensure that, despite the use of fractional-order dynamics, the physical properties and energy correlations remain consistent with fundamental physical principles.

The primary objective of this work is to develop an optimal method for the synthesis of Lyapunov functions for fractional-order systems that adhere to fundamental physical laws.

2. Direct Lyapunov method

The Direct Lyapunov Method, also known as the Second Lyapunov Method, is a fundamental approach in the stability analysis of dynamical systems. Unlike indirect methods, which rely on linearization around equilibrium points, the direct method provides a more general framework to assess the stability of dynamical systems.

This method is based on the construction of a Lyapunov function ($V(x)$), which serves as an energy-like scalar function that describes the behavior of the system over time. A properly chosen Lyapunov function can determine whether a system remains stable. The stability conditions are derived from the function's derivative along system trajectories. The dynamical system is described by [5]:

$$\mathcal{D}x_i(t) = \sum_{j=1}^n a_{ij} x_j(t) + b_i u(t) \quad i = 1, 2, \dots, n; \quad (1)$$

where:

$\mathcal{D} = \frac{d}{dt}$ – differential operator,

$n \in \mathbb{Z}^+$ – system order,

$x(t) = [x_1, x_2, \dots, x_n]^T \in X \subseteq \mathbb{R}^n$ – state vector,

$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & \dots & a_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{n1} & \dots & a_{nn} \end{bmatrix} \in \mathbb{R}^{n \times n} \text{ – state matrix,}$$

$B = [b_1, b_2, \dots, b_n]^T \in R^n$ – control vector,

$u \in U \subseteq R^n$ – control input.

All of the following definitions for this section are described in [1]. The solution of the state-space equation is given by:

$$\mathbf{x}(t) = \mathbf{p}(t, \mathbf{x}_0, t_0), \quad (2)$$

where:

$\mathbf{p}$ – vector of state transition functions,

$\mathbf{x}_0$ – initial condition.

The equilibrium point is given by:

$$x_i^e: \quad 0 = \sum_{j=1}^n a_{ij} x_j(t) + b_i u(t), \quad i = 1, 2, \dots, n, \quad (3)$$

where:

$\mathbf{x}^e = [x_1^e, x_2^e, \dots, x_n^e]^T \in X \subseteq \mathbb{R}^n$ – dynamic equilibrium point.

A Lyapunov attractor is defined as an equilibrium point or a set of states that satisfy the condition:

$$\forall |\mathbf{x}_0 - \mathbf{x}_A| < \eta, \quad \lim_{t \rightarrow \infty} \mathbf{p}(t, \mathbf{x}_0, t_0) \rightarrow \mathcal{A}, \quad \eta > 0, \quad (4)$$

where:

$\mathbf{x}_A \in \mathcal{A} \subseteq X \subseteq \mathbb{R}^n$ – attractor,

$|\mathbf{x}_0 - \mathbf{x}_A|$ – radius of the attractor neighborhood,

$\mathcal{A}$ – set of system attractors.

If the initial condition satisfies $|\mathbf{x}_0| < \delta$, then if the system's stability is defined globally, there exist infinitely many values $\varepsilon < \delta$, which determine the distances between the initial point and the dynamic equilibrium point (which, in this case, also acts as an attractor). The system trajectory consistently passes through these ε values, which can be interpreted as successive convergence to the equilibrium point.

A trajectory is stable if there exists a distance δ from the dynamic equilibrium point such that for every initial point within this distance, the system trajectory never deviates further than ε from the equilibrium point, regardless of how long the system is observed:

$$\forall \varepsilon > 0 \exists \delta > 0: |\mathbf{x}_0| < \delta \Rightarrow \lim_{t \rightarrow \infty} |\mathbf{p}(t, \mathbf{x}_0, t_0)| < \varepsilon. \quad (5)$$

If the initial condition satisfies $|\mathbf{x}_0| < \delta$, then there exist infinitely many values $\varepsilon < \delta$, which determine the distances between the initial point and the dynamic

equilibrium point (which, in this case, also acts as an attractor). The system trajectory consistently passes through these ε values, which can be interpreted as successive convergence to the equilibrium point.

To analyze the stability of such a system, it is sufficient to find a positive definite energy function $\mathcal{V}(x)$, whose level sets correspond to the values of ε , and then verify whether the system trajectory systematically decreases over time. This method of stability analysis is known as the Direct Lyapunov Method:

$$\forall t \geq t_0, \dot{\mathcal{V}}(x(t)) < 0 \quad \wedge \quad \mathcal{V}(x(t)) = \varepsilon. \quad (6)$$

The fulfillment of this condition implies that trajectory of the system and Lyapunov function values decrease over time.

3. Fractional-order modeling and control

In fractional calculus, several different definitions can be distinguished, tailored to the specificity and needs of mathematical models. One of the most commonly used and popular definitions of fractional continuous integration is the Riemann–Liouville definition [6]:

$${}_0I_t^\alpha f(t) = \frac{1}{\Gamma(\alpha)} \int_0^t (t - \tau)^{\alpha-1} f(\tau) d\tau, \quad (7)$$

where:

$\Gamma(\alpha) = \int_0^\infty t^{\alpha-1} e^{-t} dt$ – the Gamma function,
 $\alpha \in \mathbb{R}^+$ – the order of integration.

The definition of the derivative in the sense of Riemann–Liouville is based on the previously introduced fractional integral (7), upon which an integer-order derivative is applied:

$$\begin{aligned} {}^{RL}\mathcal{D}_t^\alpha f(t) &= \frac{d^\alpha}{dt^\alpha} f(t) = \frac{d^N}{dt^N} [{}_0I_t^{N-\alpha} f(t)] = \\ &= \frac{1}{\Gamma(N-\alpha)} \frac{d^N}{dt^N} \int_0^t (t - \tau)^{N-\alpha-1} f(\tau) d\tau \end{aligned}, \quad (8)$$

where:

$N - 1 < \alpha < N, \quad N \in \mathbb{N}.$

As a result of this process, derivatives of fractional order are obtained. It is worth noting that under standard conditions, the result of the integration operation is the antiderivative of a function and a constant of integration. Applying differentiation to such a result eliminates the constant, which means that the Riemann–Liouville calculus does not incorporate initial conditions in the classical sense.

Another popular definition is the Caputo fractional continuous derivative:

$${}_0^C \mathcal{D}_t^\alpha f(t) = \frac{1}{\Gamma(N-\alpha)} \int_0^t \frac{f^{(N)}(\tau)}{(t-\tau)^{\alpha+1-N}} d\tau, \quad (9)$$

In this case, the approach differs from the Riemann–Liouville definition, as the time derivative appears inside the integral. This allows the initial conditions to be preserved in their classical form. Such a formulation appears particularly useful in physical applications, especially in the stability analysis of systems using the Lyapunov method.

An important tool required for performing various operations in fractional calculus is the Laplace transform:

$$\mathcal{L}\{\mathcal{D}^\alpha(t)\}(s) = s^\alpha F(s) - \sum_{k=1}^{[\alpha]} (s^{\alpha-k}) (\mathcal{D}^{k-1}|_{t=0}). \quad (10)$$

In the case of the Riemann–Liouville definition, the Laplace transform takes the form:

$$\mathcal{L}\{{}_0^{RL} D_t^\alpha f\}(s) = s^\alpha F(s) - \sum_{k=1}^{[\alpha]} (s^{k-1}) ({}_0^{RL} D_t^{\alpha-k}|_{t=0}), \quad (11)$$

whereas for the Caputo definition, the Laplace transform is:

$$\mathcal{L}\{{}_0^C \mathcal{D}_t^\alpha f\}(s) = s^\alpha F(s) - \sum_{k=1}^{[\alpha]} (s^{\alpha-k}) ({}_0^C \mathcal{D}_t^{\alpha-k}|_{t=0}). \quad (12)$$

The Simulink environment [7], available in the Matlab software package, offers a range of libraries developed by experts in the field of fractional-order differential and integral calculus. One of the most comprehensively documented libraries is FOMCON (Fractional-order Modeling and Control) [8]. This library is based on a modified version of the Oustaloup approximation [9, 10], which takes into account the characteristic features of operator transfer functions – namely, the absence of initial conditions – and utilizes the Laplace transform of fractional-order calculus:

$$s^\alpha \approx G_\omega \prod_{k=-N}^N \frac{s + \omega_{k'}}{s + \omega_k}, \quad (13)$$

where:

$$G_\omega = \left(\frac{d\omega_h}{b}\right)^\alpha \left(\frac{ds^2 + b\omega_h s}{d(1-\alpha)s^2 + b\omega_h s + d\alpha}\right)^{\frac{\alpha+2k}{2N+1}},$$

$$\omega_k = \left(\frac{b\omega_h}{d}\right)^{\frac{\alpha+2k}{2N+1}}, \quad \omega_{k'} = \left(\frac{d\omega_h}{b}\right)^{\frac{\alpha-2k}{2N+1}}.$$

The approximation enables the modeling of fractional orders within a specified frequency band $\omega = (\omega_b, \omega_h)$, where the accuracy of the approximation also depends on the number of terms N chosen in the series expansion. The constants $b > 0$ and $d > 0$ are user-defined tuning parameters.

4. Fractional-order systems Lyapunov function synthesis

The parameters of the Lyapunov function (6) for an autonomous system can be determined by minimizing the cost functional:

$$J = \int_0^\infty [x^T Q x] dt, \quad (14)$$

which can be equivalently rewritten as:

$$J = x_0^T P x_0 - x_0^T P x_0 + \int_0^\infty [x^T Q x] dt, \quad (15)$$

and then the negative term can be introduced under the integral:

$$J = x_0^T P x_0 + \int_0^\infty \left[\frac{d}{dt} (x^T P x) + x^T Q x \right] dt. \quad (16)$$

This is valid since:

$$\int_0^\infty \frac{d}{dt} (x^T P x) dt = [x^T P x]_0^\infty = 0 - x_0^T P x_0, \quad (17)$$

as the state vector of the autonomous system tends to zero at infinity, and at time zero, it is equal to the initial conditions.

An equivalent expression for the derivative $\frac{d}{dt} (x^T P x)$ is $\dot{x}^T P x + x^T P \dot{x}$, and thus the cost functional further develops into the form:

$$J = x_0^T P x_0 + \int_0^\infty [\dot{x}^T P x + x^T P \dot{x} + x^T Q x] dt. \quad (18)$$

In the case of linear, stationary systems of integer order, the derivative $\dot{x}$ is defined by the state equation, which simplifies the solution. However, for fractional-order systems, the problem becomes more complex. The solution to the state equation of an autonomous fractional-order system is given by the Mittag-Leffler series [11]:

$$x(t) = E_\alpha(A t) \cdot x_0 = \sum_{k=0}^\infty \frac{A^k t^{k\alpha}}{\Gamma(k\alpha+1)} x_0, \quad (19)$$

whose time derivative for each term is:

$$\dot{x}(t) = \sum_{k=0}^\infty \frac{k\alpha A^k t^{k\alpha-1}}{\Gamma(k\alpha+1)} x_0, \quad (20)$$

which significantly complicates further transformations related to the cost functional. For this reason, it is reasonable to search for the minimal solution of the cost functional numerically, e.g., using the simplex method [12], which is efficient and effective.

Ultimately, one more modification is required for the cost functional. During optimization, due to computational effects, the value of the objective function may become negative. Therefore, an absolute value should be introduced under the integral to ensure that the functional possesses a definable minimum that can be located by the simplex algorithm. The cost functional is evaluated along a simulated trajectory, i.e., a numerical solution of the system dynamics computed for a given initial condition using a discrete-time integration method. This approach allows the functional to be minimized empirically, based on a finite set of state and state-derivative samples.

To implement the optimization in computational software, the continuous-time objective functional is discretized using a uniform time step ΔT , resulting in the approximation:

$$J^* \approx x_0^T P x_0 + \sum_{i=0}^N \left| \left(\frac{x_{i+1} - x_i}{\Delta T} \right)^T P x_i + x_i^T P \left(\frac{x_{i+1} - x_i}{\Delta T} \right) + x_i^T Q x_i \right| \Delta T, \quad (21)$$

where:

- N – number of discrete time steps,
- ΔT – fixed simulation time step,
- $x_i := x(i\Delta T)$ – discrete state at time $t_i = i\Delta T$,
- $x_{i+1} := x((i+1)\Delta T)$ – discrete state at next time step.

The problem can be solved using the Nelder-Mead method (simplex) [12, 13]. The obtained solution identifies, with a given precision, the minimum of the unit cost functional (21). The method adjusts the function $x^T P x$ in such a way that it determines the minimal cost of the natural trajectory of the system through the state-space, which aligns with the principle of least action. Minimization of the cost functional is performed on a numerical solution of the system dynamics obtained through time-domain simulation, given an initial condition and a known (or estimated) system model. The optimization of the cost functional is thus not performed analytically over the entire state space, but empirically – that is, along sample trajectories computed using the assumed dynamics. This approach is often used when the system is too complex for analytical treatment or when data-driven methods are employed.

The optimization process results in the determination of a matrix P , which serves as the parameter for constructing the Lyapunov function. Specifically, the quadratic Lyapunov function is given by:

$$V(x) = x^T P x, \quad (22)$$

where $x \in \mathbb{R}^n$ is the state vector of the system, and P is the matrix obtained through optimization. This quadratic form is used to assess the stability of the system by analyzing the time derivative of $V(x)$. The stability criteria are satisfied if the derivative of $V(x)$ along the trajectories of the system is negative definite, indicating that the system converges to the equilibrium point. This function is also used in control algorithms.

5. Results

Trajectories in the state space are obtained by simulating a fractional-order system built using the Fractional-Order Modeling and Control Toolbox (FOMCON) in Simulink, as shown in Figure 1. Results are obtained with the simulation of a fractional dynamical system with the state matrix:

$$A_1 = \begin{bmatrix} -0.1 & -1 \\ 2 & -0.1 \end{bmatrix}, \quad (23)$$

and the control vector, which has the form $B = [0 \ 1]^T$, is subjected to control $u = \mathbf{1}(t)$, with zero initial conditions. The state matrix has this form because, in classical solutions, its eigenvalues are close to the positive part of the complex plane, so it is easier to evaluate if the solution of Lyapunov function synthesis is valid. The system is initialized with zero initial conditions, since various definitions of fractional-order systems are known to be convergent to each other under this assumption. Therefore, to ensure consistency and convergence, zero initial conditions are applied. Moreover, since FOMCON uses the Oustaloup approximation, it does not allow setting initial conditions, so they cannot be used in this case.

Although the Lyapunov method requires non-zero initial conditions, they can be artificially introduced by translating the trajectory so that the equilibrium point of the controlled system is positioned at the origin of the state space.

$$\Delta x = x - x_e, \quad (24)$$

where:

x_e – equilibrium point.

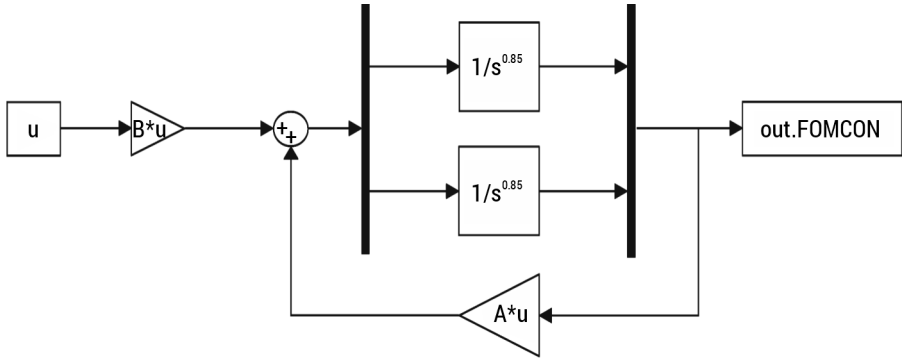


Figure 1. Model of a second-order system using the FOMCON toolbox in Simulink.

Source: own studies.

Empirical method for synthesizing a Lyapunov function for the dynamics of a fractional-order system is based on the optimization of a cost functional. The resulting matrices are presented in Table 1.

Table 1. The optimized matrices P_1

α	P_1
1.0	$\begin{bmatrix} 6.643 & 0.061 \\ 0.162 & 3.332 \end{bmatrix}$
0.9	$\begin{bmatrix} 2.367 & 0.098 \\ 0.072 & 1.085 \end{bmatrix}$
0.8	$\begin{bmatrix} 1.592 & -0.029 \\ 0.118 & 0.697 \end{bmatrix}$
0.7	$\begin{bmatrix} 1.289 & 0.094 \\ -0.051 & 0.620 \end{bmatrix}$
0.6	$\begin{bmatrix} 1.145 & -0.099 \\ 0.138 & 0.683 \end{bmatrix}$
0.5	$\begin{bmatrix} 1.147 & 0.016 \\ 0.022 & 0.941 \end{bmatrix}$

Source: own studies.

The following figures represent the analysis of the fractional-order system trajectories and the optimal Lyapunov function for two different fractional orders: $\alpha = 0.85$ and $\alpha = 0.5$. Figure 2 shows the trajectory of the fractional-order system with $\alpha = 0.85$, along with the contour plots of the optimal Lyapunov function, which provide insight into the system's stability behavior.

Figure 3 illustrates the optimal Lyapunov function for the system with $\alpha = 0.85$. Similarly, Figure 4 depicts the trajectory of the fractional-order system with $\alpha = 0.5$, accompanied by the contour plots of the corresponding optimal Lyapunov function.

Finally, Figure 5 presents the optimal Lyapunov function for the system with $\alpha = 0.5$. These figures provide a comprehensive view of the system dynamics and the stability analysis for different fractional-order values. One can observe that the optimization reflects not only scaling along the axes but also the rotation of the function, maintaining proper alignment in the state space.

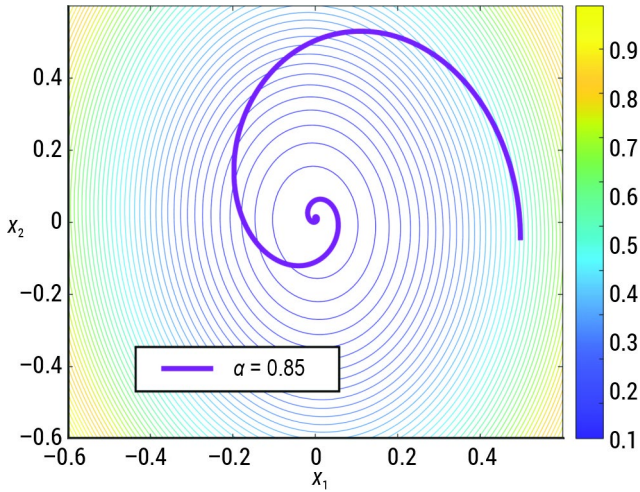


Figure 2. The trajectory of the fractional-order system with $\alpha = 0.85$ and the contour plots of the optimal Lyapunov function

Source: own studies.

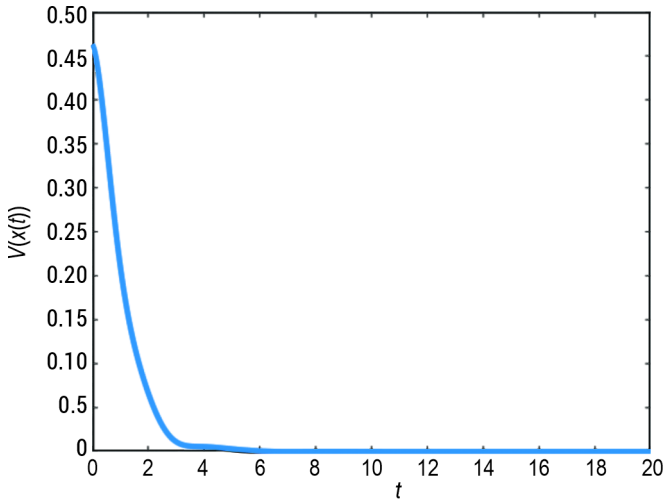


Figure 3. The optimal Lyapunov function of the system with order $\alpha = 0.85$

Source: own studies.

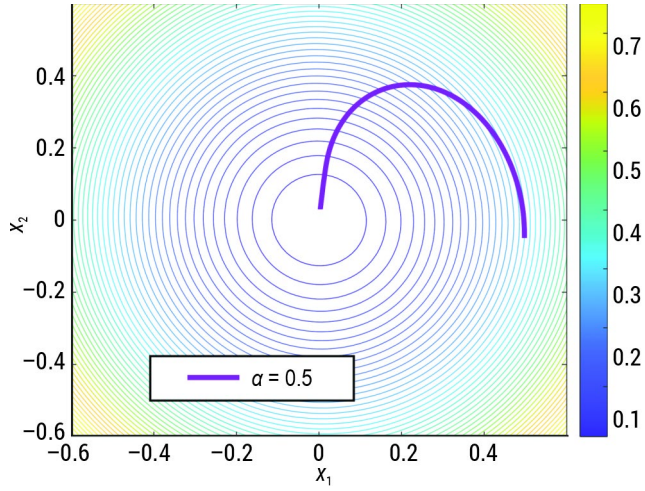


Figure 4. The trajectory of the fractional-order system with $\alpha = 0.5$ and the contour plots of the optimal Lyapunov function

Source: own studies.

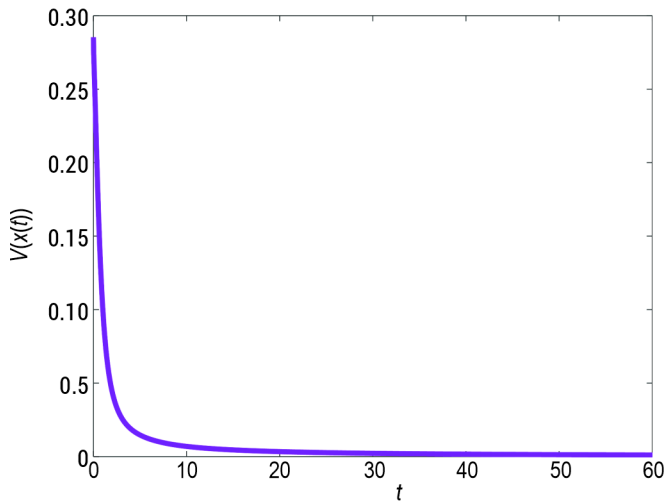


Figure 5. The optimal Lyapunov function of the system with order $\alpha = 0.5$

Source: own studies.

This section demonstrates that the optimization method is capable of generating valid, integer-order Lyapunov functions for fractional-order systems. The combination of visual state space trajectories and quantitative time-domain plots provides compelling evidence that the resulting functions accurately capture the system's dynamics and proves its stability according to classical Lyapunov theory.

6. Conclusions

The paper presents an empirical method for synthesizing Lyapunov functions for fractional-order systems, addressing the inherent challenges associated with non-integer-order dynamics. The proposed approach integrates an optimal control formulation with numerical optimization based on the Nelder-Mead simplex algorithm. This methodology enables the construction of positive semi-definite Lyapunov functions for system orders $\alpha \in [0.5, 1.0]$. Simulations carried out in Simulink using the FOMCON toolbox validate the effectiveness of the method, with the resulting system trajectories aligning with theoretical predictions derived from Lyapunov stability theory. The resulting quadratic functions offer a systematic framework for stability analysis while preserving physical consistency in the presence of fractional-order behavior. The method differs from standard approaches to Lyapunov function construction, as in the case of linear systems there is no need to search for candidate functions – they can be directly obtained by minimizing a cost functional.

At present, the method depends on empirical data supported by simulation results. Future research will focus on deriving analytical solutions to the cost functional, thereby eliminating the need for experimental procedures and enabling a deeper exploration of how fractional-order optimization problems relate to classical control theory frameworks.

Acknowledgement

This work was supported by the National Science Centre in Poland under work No. 2022/45/B/ST7/03076 (G/WE-IA/1/2023).

Literature

- [1] Hahn, W. (2012). *Stability of motion (Grundlehren der mathematischen Wissenschaften)*. Springer.
- [2] Aguila-Camacho, N., Duarte-Mermoud, M. A., Gallegos, J. A. (2014). Lyapunov functions for fractional order systems. *Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation*, 19(9). <https://doi.org/10.1016/j.cnsns.2014.01.022>
- [3] Abd-Elmonem, A., Banerjee, R., Ahmad, S., Jamshed, W., Nisar, K. S., Eid, M. R., Ibrahim, R. W., El Din, S. M. (2023). A comprehensive review on fractional-order optimal control problem and its solution. *Open Mathematics*, 21(1). <https://doi.org/10.1515/math-2023-0105>
- [4] Sikora, R. (2016). Pochodne ułamkowe w teorii obwodów elektrycznych. Uwagi krytyczne. *Przegląd Elektrotechniczny*, 92(10), 274–276. <https://doi.org/10.15199/48.2016.10.62>
- [5] Kaczorek, T. (1993). *Teoria sterowania i systemów* (3rd ed.). Wydawnictwo Naukowe PWN.

- [6] Kaczorek, T., Rogowski, K. (2015). *Fractional linear systems and electrical circuits*. Springer.
- [7] Simulink. (2025). *Documentation*. <https://www.mathworks.com/help/simulink>
- [8] FOMCON. (2025). *Documentation*. <https://fomcon.net>
- [9] Tepljakov, A., Petlenkov, E., Belikov, J. (2012). A flexible MATLAB tool for optimal fractional-order PID controller design subject to specifications. *Proceedings of the 31st Chinese Control Conference, IEEE*. <https://ieeexplore.ieee.org/document/6390753>
- [10] Oustaloup, A., Levron, F., Mathieu, B., Nanot, F. M. (2000). Frequency-band complex noninteger differentiator: characterization and synthesis. *IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Fundamental Theory and Applications*, 47(1). <https://ieeexplore.ieee.org/document/817385>
- [11] Popolizio, M. (2019). On the matrix Mittag-Leffler function: Theoretical properties and numerical computation. *Mathematics*, 7(12).
- [12] Nelder, J. A., Mead, R. (1965). A simplex method for function minimization. *The Computer Journal*, 7(4). <https://doi.org/10.1093/comjnl/7.4.308>
- [13] Lagarias, J. C., Reeds, J. A., Wright, M. H., Wright, P. E. (1998). Convergence properties of the Nelder-Mead simplex method in low dimensions. *SIAM Journal of Optimization*, 9(1). <https://doi.org/10.1137/S1052623496303470>

Zastosowanie uczenia maszynowego w lokalizacji wewnątrzbudynkowej z wykorzystaniem wskaźnika RSSI

Mateusz Sumorek

Katedra Fotoniki, Elektroniki i Techniki Świetlnej

Wydział Elektryczny

Politechnika Białostocka

mateusz.sumorek@pb.edu.pl

Abstract: This article presents experimental research on indoor localization of a mobile robot using Wi-Fi signal strength indicator (RSSI) and machine learning. The k-NN algorithm was applied to estimate the robot's position based on fingerprinting database of radio signal values. Tests in a 5×5 m area showed an average localization error of 2.34 m, with minimum errors as low as 0.23 m. The results indicate the method's potential for sector detection, but further work is needed to improve accuracy by refining signal mapping and reducing interference effects.

Key words: indoor localization, machine learning, RSSI, mobile platform, IoT

1. Wstęp

Lokalizacja wewnątrzbudynkowa jest dziedziną dynamicznie rozwijającą się na przestrzeni ostatnich lat. Wzrost zainteresowania tym zagadnieniem jest szczególnie uwidoczniony w liczbie ukazujących się publikacji obejmujących tę tematykę [1]. Podsyktowane jest to wzrostem zapotrzebowania na zastosowanie technik lokalizacji w różnych dziedzinach. Stale rozwijające się przemysł, optymalizacja i automatyzacja procesów, efektywniejsze zarządzanie pracownikami oraz zasobami materialnymi, logistyka, rozwój gier komputerowych, sportu czy badań naukowych – to dziedziny, w których lokalizacja wewnątrzbudynkowa znajduje zastosowanie [2–5].

Systemy nawigacji satelitarnej, takie jak GPS, GLONASS, Galileo czy BeiDou, mimo dużej dokładności określania lokalizacji na otwartej przestrzeni, nie znajdują zastosowania wewnątrz budynków. Wynika to z ograniczeń propagacji sygnału radiowego spowodowanych konstrukcją budynku [5]. W efekcie występują duże błędy w podawaniu lokalizacji bądź całkowita utrata sygnału i brak możliwości określenia położenia.

Do określania lokalizacji wewnątrz budynków stosuje się alternatywne technologie, takie jak Bluetooth, Wi-Fi, RFID, UWB (ang. *Ultra WideBand*), techniki bezwładnościowe czy też systemy wykorzystujące ultradźwięki [2–5]. Rozwiązania

oparte o UWB charakteryzują się bardzo dużą dokładnością, wynoszącą <1 m wewnątrz budynków [6]. Ze względu na ograniczony zasięg oraz bardzo wysoki koszt towarzyszącej infrastruktury nie znajdują one jednak szerokiego zastosowania. Techniki inercyjne (bezwładnościowe) są natomiast tanie i mogą działać niezależnie od infrastruktury. Ich kluczową wadą jest jednak obarczenie dryftem wynikającym z błędów przyrostowych, co powoduje konieczność okresowej kalibracji. Z tego powodu częściej wykorzystywane są w przypadku integracji z innymi systemami [1, 5]. RFID jest systemem działającym na małym obszarze i znajduje zastosowanie przede wszystkim jako detekcja obecności w pobliżu punktu, zaś w celu dokładniejszej lokalizacji konieczne jest posiadanie siatki urządzeń detekcyjnych [2, 5, 8]. Technologie takie jak Wi-Fi czy Bluetooth są ustandaryzowane, tanie, a potrzebna infrastruktura jest powszechnie dostępna. Lokalizowanie wykorzystujące te rozwiązania opiera się najczęściej o wskaźnik mocy odebranego sygnału (RSSI, ang. *Received Signal Strength Indicator*) [1, 2, 4, 5]. Takie podejście charakteryzuje się jednak zazwyczaj niską dokładnością lokalizacji na poziomie pojedynczych metrów.

Po uwzględnieniu wymienionych wyżej kwestii widać wyraźnie, że istnieje potrzeba rozwoju systemów lokalizowania osób i obiektów wewnątrz budynków. Kluczowymi aspektami pozostają zaś możliwość łatwego wdrożenia danych rozwiązań, ich niski koszt oraz możliwość standaryzacji.

Niniejszy artykuł omawia problemy związane z wewnątrzbudynkowym określaniem lokalizacji, wykorzystującym systemy radiowe, oraz przedstawia wyniki badań eksperymentalnych.

Badania zrealizowano, wykorzystując pomiary mocy sygnału otrzymanego z użyciem technologii Wi-Fi oraz technik uczenia maszynowego w celu estymacji położenia platformy mobilnej. Uzyskane wyniki badań pozwolą na określenie dokładności proponowanego rozwiązania, a także umożliwią jego dalszy rozwój.

2. Techniki radiowe w lokalizacji wewnątrzbudynkowej

W celu określenia kierunku propagacji sygnału radiowego lub odległości, w jakiej znajduje się jego źródło, wykorzystuje się różne techniki radiowe. Należą do nich [9]:

- AoA (ang. *Angle of Arrival*),
- AoD (ang. *Angle of Departure*),
- PoA (ang. *Phase of Arrival*),
- TDoA (ang. *Time Difference of Arrival*),
- RTT (ang. *Round Trip Time*),
- RSSI.

Techniki takie jak AoA, AoD, PoA, TDoA i RTT charakteryzują się dużą dokładnością określania kierunku lub odległości. Niestety kluczowym problemem w tym przypadku jest znacząca złożoność technologiczna urządzeń wykorzystujących wspomniane rozwiązania, co wiąże się z wysokimi kosztami implementacyjnymi. Niewielu

producentów, nawet mimo ustandaryzowania pewnych rozwiązań (np. techniki AoA w Bluetooth), decyduje się na ich praktyczne wdrożenie [10]. Ponadto, sam fakt znajomości odległości bądź kierunku między dwoma punktami nie pozwala na określenie położenia obiektu w przestrzeni. Jest to zatem kolejny czynnik wpływający na wzrost kosztów wynikających z rozbudowy koniecznej infrastruktury.

Określenie położenia obiektu, znając odległości bądź kierunki źródła sygnału radiowego względem znanych punktów (urządzeń) referencyjnych, jest możliwe z wykorzystaniem multilateracji (w przypadku odległości) bądź triangulacji (w przypadku kierunków lub kątów) [1, 4, 5].

Zastosowanie wskaźnika mocy otrzymanego sygnału stanowi jedną z najczęściej używanych technik lokalizacji. Uwarunkowane jest to niskim kosztem oraz powszechnym dostępem do technologii i infrastruktury. Technologie takie jak Bluetooth czy Wi-Fi pozwalają na zastosowanie wskaźnika RSSI do lokalizacji:

$$P_R = \frac{\lambda^2}{(4\pi d)^2} G_T P_T G_R \quad (1)$$

gdzie:

- P_R – moc otrzymana,
- G_T oraz G_R – zyski anteny nadawczej i odbiorczej,
- P_T – moc sygnału nadawanego,
- λ – długość fali elektromagnetycznej
- d – dystans między nadajnikiem i odbiornikiem [11].

Wskaźnik RSSI wyraża moc otrzymanego sygnału wyrażoną w dBm. W przypadku propagacji w wolnej przestrzeni moc otrzymanego sygnału można wyrazić za pomocą wzoru Frissa (1):

$$d = \frac{1}{4\pi} \sqrt{\frac{\lambda^2 G_T P_T G_R}{P_R}} \quad (2)$$

Przekształcając równanie (1), jesteśmy w stanie uzyskać zależność (2) odległości od parametrów toru transmisyjnego oraz mocy zarówno nadawanego, jak i odbieranego sygnału. Taka sytuacja stanowi jednak wyidealizowany przypadek, odnoszący się do propagacji w wolnej przestrzeni:

$$PL_{dB}(d) = PL_{dB}(d_0) + 10\gamma \log \frac{d}{d_0} + X_\sigma \quad (3)$$

gdzie:

- $PL_{dB}(d_0)$ – straty propagacyjne w odległości referencyjnej d_0 ,
- d – odległość między nadajnikiem a odbiornikiem,

- γ – wykładnik strat propagacyjnych,
 X_σ – zmienna losowa o rozkładzie normalnym.

W przypadku propagacji wewnątrz budynków można zastosować inne modele, np. *log-distance path loss model* (3), który charakteryzuje straty propagacyjne wewnątrz budynków lub na obszarach o gęstej zabudowie [12]. Przekształcając ten wzór, znając moc sygnału nadawanego oraz odbieranego i parametry toru transmisyjnego, jesteśmy w stanie określić odległość między nadajnikiem a odbiornikiem.

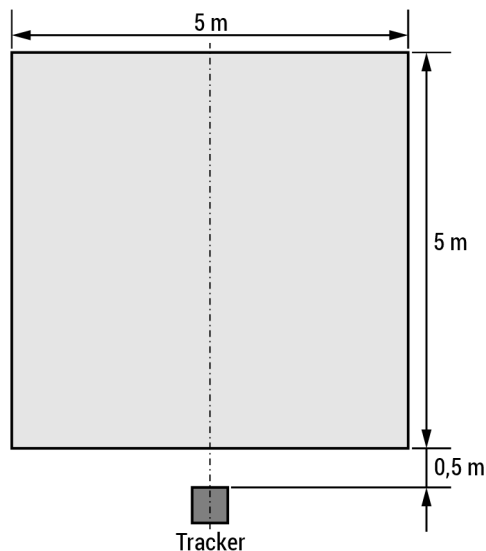
Podejście takie, nawet mimo zastosowania modelu przeznaczonego do danego środowiska, wciąż jest jedynie przybliżeniem zjawiska, które nie uwzględnia takich kwestii, jak interferencje czy wielodrogowość [1, 4, 12, 13]. Ponadto wartości mocy odbieranego sygnału są silnie zależne od rozpatrywanego otoczenia, materiałów, z jakiego zostało wykonane, jego geometrii, przeszkód oraz zmian w nim zachodzących. W znaczący sposób wpływają one bowiem na uzyskane rezultaty i uniemożliwiają skuteczne określenie odległości, a w rezultacie położenia obiektu.

Alternatywnym podejściem jest wykorzystanie metody „odcisków palców” (ang. *fingerprinting*) polegającej na opracowaniu mapy (bazy danych) wartości mocy odebranych sygnałów w rozpatrywanym otoczeniu. Mapę taką wykonuje się poprzez rejestrację wartości RSSI (od stacjonarnych nadajników) oraz rzeczywistego położenia obiektu w danym punkcie. W momencie lokalizacji obiektu ponownie wykonywane są pomiary RSSI, a następnie, na podstawie opracowanej uprzednio mapy, dopasowywany jest tzw. odcisk palca [3–5, 13, 14]. Znalezienie najbardziej zbliżonego „odcisku” pozwala na odczytanie przypisanego do niego położenia, które stanowi estymację położenia rzeczywistego. Metoda ta wciąż pozostaje podatna na zmienność wartości sygnałów w wyniku interferencji, wielodrogowości czy też zmian w otoczeniu, lecz bazowo jest ona oparta o rzeczywiste wartości dla danego środowiska, a nie stanowi jedynie uśrednione przybliżenie zjawiska.

3. Badania

Badania zostały wykonane przy użyciu urządzeń Wi-Fi pracujących jako punkty dostępowe (stacjonarne) oraz jednego urządzenia klienckiego, będącego urządzeniem lokalizowanym (lokalizatorem). Lokalizator umieszczono na platformie mobilnej poruszającej się po wyznaczonym obszarze w kształcie prostokąta o wymiarach ok. 5 x 5 m.

Do pomiarów referencyjnych wykorzystano zestawy HTC Vive Base Station 2.0 i HTC Vive Tracker 3.0 wykorzystujący technologię LIDAR, zapewniającą dokładność pomiarów położenia <1cm [14]. Stacja bazowa tego systemu została rozmieszczona zgodnie z rysunkiem 1, tracker zaś umieszczono, wraz z lokalizatorem Wi-Fi, na platformie mobilnej (rysunek 2).

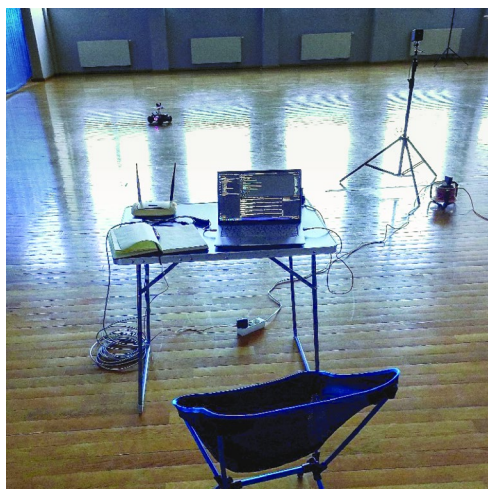


Rysunek 1. Schemat rozmieszczenia systemu referencyjnego względem pola roboczego
Źródło: opracowanie własne.



Rysunek 2. Platforma mobilna wraz z lokalizatorem Wi-Fi i HTC Vive Tracker 3.0
Źródło: opracowanie własne.

Rysunek 3 przedstawia stanowisko pomiarowe złożone z laptopa i routera z Wi-Fi, działającego jako punkt dostępowy (ang. *access point*). Komputer wyposażony został natomiast w autorskie oprogramowanie pozwalające na kontrolowanie i monitorowanie całego eksperymentu w sposób zdalny.



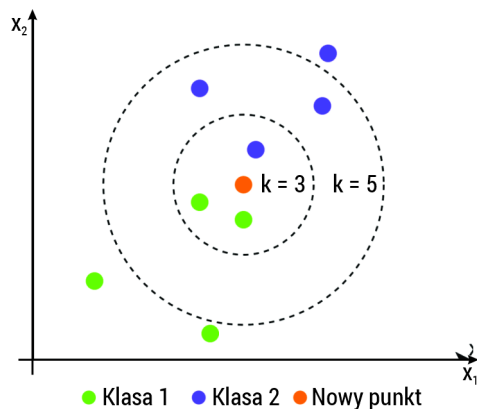
Rysunek 3. Stanowisko pomiarowe

Źródło: opracowanie własne.

Pomiarów dokonano w hali sportowej, na obszarze wyznaczonym zgodnie z rysunkiem 1. Procedura pomiarowa została podzielona na dwa etapy. Pierwszym było wykonanie pomiarów potrzebnych do opracowania bazy danych (mapy mocy sygnałów) zawierającej wartości mocy odebranych sygnałów. Pomiarów te przeprowadzono w postaci siatki pomiarów, w odległościach ok. 0,5 m między poszczególnymi pomiarami. W każdym punkcie wykonano osiem pomiarów RSSI. Dla każdej wartości siły odebranego sygnału został również przypisany identyfikator (SSID) informujący, względem którego punktu dostępowego została ona zmierzona. Pomiarów uzupełniono o odczyty położenia platformy mobilnej z czujników referencyjnych. Drugi etap polegał na zebraniu danych do testów opracowanego modelu. Pomiarów te zostały wykonane w siedmiu losowo rozmieszczonych punktach wewnątrz wyznaczonego obszaru. Również w tym przypadku do zapisanych wartości mocy odebranego sygnału zostały przypisane identyfikatory punktów dostępowych oraz informacje o położeniu z systemu referencyjnego.

4. Zastosowanie uczenia maszynowego

Posiadanie mapy sygnałów oraz pomiarów testowych pozwoliło na przygotowanie modelu do lokalizacji platformy mobilnej. *Fingerprinting* jest metodą polegającą na znalezieniu najbardziej zbliżonego do aktualnie otrzymanego zbioru na skutek pomiaru w bazie danych (mapie sygnałów), a następnie odczytaniu przypisanej mu lokalizacji. Lokalizacja ta jest estymacją położenia lokalizowanego obiektu. Powyższy problem stanowi zagadnienie klasyfikacyjne – w związku z tym zdecydowano się na wykorzystanie algorytmu K-najbliższych sąsiadów (ang. *k-nearest neighbors*, k-NN) do realizacji tego zadania [16, 17].



Rysunek 4. Graficzna reprezentacja algorytmu k-NN dla $k = 3$ oraz $k = 5$

Źródło: opracowanie własne.

Z założenia algorytm k-NN posiada zbiór zawierający punkty (wielowymiarowe) będące danymi uczącymi (mapą mocy sygnałów). Każdy z tych punktów zawiera wektor z informacjami wejściowymi (moce otrzymanych sygnałów) oraz przypisaną etykietę klasy (koordynaty położenia obiektu). Następnie do modelu wprowadzany jest nowy punkt (zawierający wartości z pomiaru testowego) i algorytm przypisuje go do jednej z ustalonych w modelu klas (koordynat). Przypisanie następuje na podstawie wyliczonej odległości do k -najbliższych sąsiadów, czyli najbliższych k -punktów, wśród których dominują punkty danej kategorii. Liczba k -punktów oraz sposób obliczania odległości są parametrami opracowywanego modelu [16, 17].

Rysunek 4 przedstawia graficznie ideę algorytmu. W bazie danych mamy punkty należące do dwóch klas, a następnie poszukujemy najbliższych k -punktów do nowo pozyskanego punktu. W zależności od tego, do której klasy należy dominująca liczba punktów, do niej przypisujemy nowy punkt. Ponadto, kryterium klasyfikacji jest uzależnione również od systemu wagowania punktów [17].

5. Wyniki i dyskusja

W celu określenia dokładności lokalizacji wyznaczone zostały maksymalny, minimalny oraz średni błąd położenia:

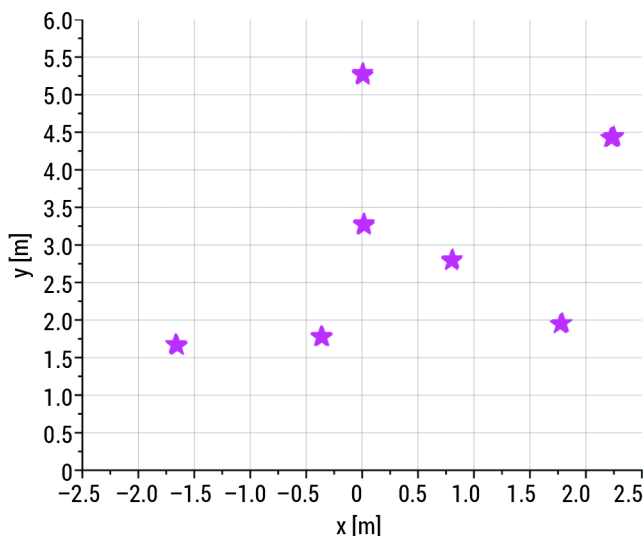
$$d_{ERR}(P_{ref}, P_{test}) = \sqrt{(x_{ref} - x_{test})^2 + (y_{ref} - y_{test})^2} \quad (4)$$

gdzie:

d_{ERR} – odległość wyrażona w metrach między punktami $P_{ref}(x_{ref}, y_{ref})$ a $P_{test}(x_{test}, y_{test})$.

Błąd położenia d_{ERR} wyznaczono na podstawie wzoru (4). Określa on odległości między punktem $P_{ref}(x_{ref}, y_{ref})$, opisującym położenie rzeczywiste (na podstawie pomiaru referencyjnego), a punktem $P_{test}(x_{test}, y_{test})$, opisującym położenie estymowane z pomiaru wartości RSSI. Błąd wyrażony został w metrach.

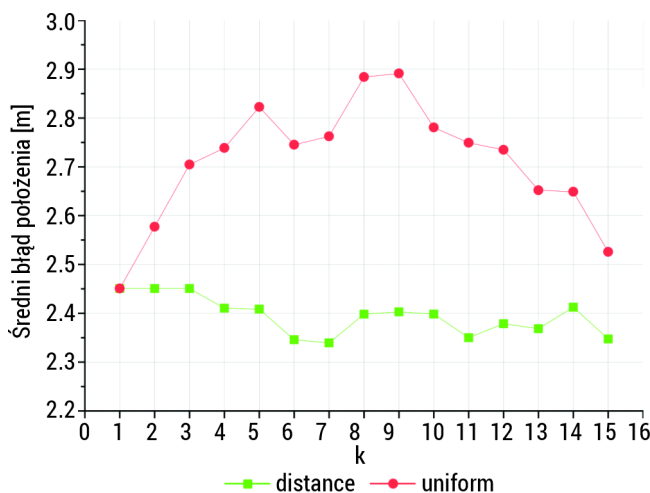
Zestaw danych testowych zawierał 56 pomiarów. Pomiaru te zostały wykonane w siedmiu losowych położeniach, wewnątrz rozpatrywanego obszaru. W każdym z siedmiu położen zostało wykonanych osiem pomiarów. Rysunek 5 przedstawia lokalizacje pomiarów testowych wewnątrz analizowanego obszaru. Współrzędne na wykresie przedstawiają położenie względem urządzenia do pomiarów referencyjnych, tak jak przedstawiono na rysunku 1.



Rysunek 5. Reprezentacja graficzna położen punktów testowych

Źródło: opracowanie własne.

Kluczowym etapem opracowywania modelu do lokalizacji było dobranie odpowiednich parametrów, tak aby uzyskać możliwie jak najlepsze rezultaty. W tym celu zestawione zostały średnie błędy położenia dla lokalizacji testowych. Rysunek 6 przedstawia wartość średniego błędu położenia z 56 pomiarów, w funkcji k-sąsiadów. Krzywa *uniform* reprezentuje zastosowanie jednorodnych wag dla punktów w sąsiedztwie, z kolei krzywa *distance* pokazuje zastosowanie wag będących odwrotnością odległości – oznacza to, że punkty w pobliżu mają większy wpływ na rezultat klasyfikacji niż punkty bardziej oddalone. Do dalszej analizy wybrano najlepszy model dla każdego rodzaju wag.



Rysunek 6. Zależność średniego błędu położenia od liczby k-sąsiadów

Źródło: opracowanie własne.

Tabela 1. Zestawienie wartości średnich błędów najlepszych modeli

Wagi	k	Średni błąd położenia	Średni błąd położenia w osi X	Średni błąd położenia w osi Y
		[m]	[m]	[m]
Distance	7	2,34	1,63	1,33
Uniform	1	2,45	1,71	1,45

Źródło: opracowanie własne.

Zgodnie z tabelą 1 najlepsze rezultaty uzyskano przy $k = 7$ dla wag *distance*, gdzie średni błąd położenia wyniósł 2,34 m, oraz przy $k = 1$ dla wag *uniform*, gdzie ten sam błąd wyniósł 2,45 m. Analizując średnie błędy położenia w poszczególnych osiach, widzimy, że dla wag *distance* wyniosły one 1,63 m w osi X oraz 1,33 m w osi Y, zaś w przypadku wag *uniform* było to odpowiednio 1,71 oraz 1,45 m.

Tabela 2. Zestawienie wartości maksymalnych błędów

Wagi	k	Maksymalny błąd położenia	Maksymalny błąd położenia w osi X	Maksymalny błąd położenia w osi Y
		[m]	[m]	[m]
Distance	7	5,00	4,03	4,26
Uniform	1	5,00	4,03	4,26

Źródło: opracowanie własne.

Analizując błędy maksymalne zestawione w tabeli 2, można zauważyć, że w obu wybranych sytuacjach były identyczne. Wynosiły one odpowiednio 5,00 m w przypadku błędu położenia, 4,03 m w osi X oraz 4,26 m w osi Y.

Tabela 3 przedstawia błędy minimalne. Ogólny minimalny błąd położenia w obu przypadkach wyniósł 0,23 m. W przypadku osi X wyniósł on 0,01 m dla wag *distance* i 0,05 m dla wag *uniform*. Błędy minimalne dla osi Y wyniosły odpowiednio 0,06 m oraz 0,05 m.

Tabela 3. Zestawienie wartości minimalnych błędów

Wagi	k	Minimalny błąd położenia	Minimalny błąd położenia w osi X	Minimalny błąd położenia w osi Y
		[m]	[m]	[m]
Distance	7	0,23	0,01	0,06
Uniform	1	0,23	0,05	0,05

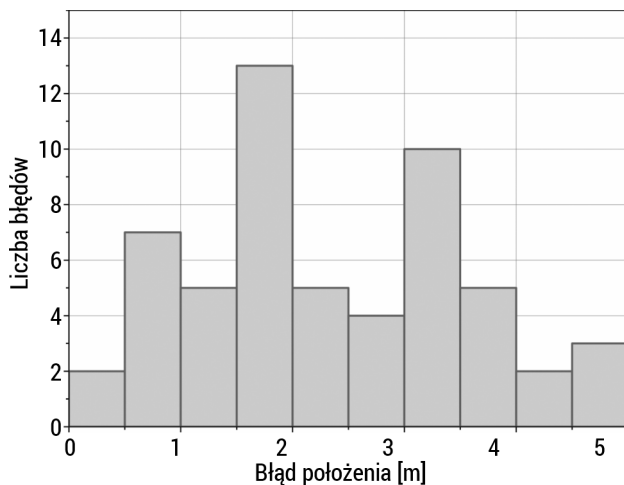
Źródło: opracowanie własne.

Na podstawie przedstawionych wyników można stwierdzić, że modele wykorzystujące wagi *uniform* dały gorsze rezultaty niż modele z wagami *distance*, co można zaobserwować na rysunku 6. Ponadto wartości błędów w przypadku modelu z wagami *distance* mają mniejszy rozrzut niż w przypadku modeli z wagami *uniform*. Wybierając najlepsze modele z obu podejść, widzimy, że różnica między średnimi błędami położenia wynosi 0,11 m na korzyść modelu z wagami *distance*, co przekłada się na poprawę dokładności lokalizacji o ok. 5%. Analizując wartości błędów położenia w poszczególnych osiach płaszczyzny, możemy zauważyć poprawę o ok. 4,7% w osi X oraz o ok. 8,3% w osi Y.

Biorąc pod uwagę rozmiar analizowanego obszaru badań (ok. 5 x 5 m), należy stwierdzić, że średnie wartości błędów położenia na poziomie 2,34 m skutkują niewielką dokładnością lokalizacji. Błędy minimalne wskazują z kolei, iż w sprzyjających warunkach możliwe jest osiągnięcie dokładności lokalizacji na poziomie centymetrowym. W przypadku błędów maksymalnych wartości uchybów są porównywalne do rozmiarów obszaru badawczego. Histogram przedstawiony na rysunku 7 pozwala jednak wywnioskować, iż dominują błędy w zakresie od 1,50 do 2,00 m, zaś błędy poniżej 2,00 m stanowią 44,6% wszystkich (25 z 56). Rysunek 8 przedstawia graficznie, za pomocą kolorowych kropek, położenia rzeczywiste oraz estymowane przez model za pomocą kolorowych gwiazdek. Poszczególne punkty położenia rzeczywistego i estymowanego odpowiadają sobie kolorami.

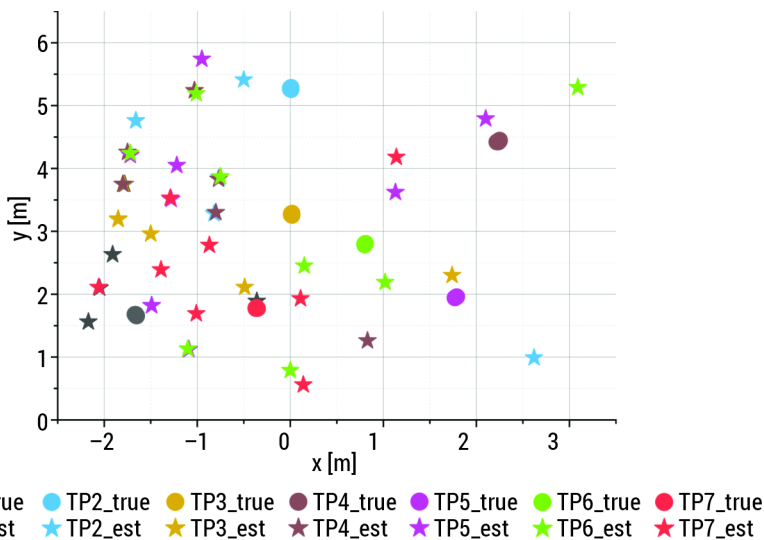
Wykorzystanie klasyfikacji do lokalizacji jest często poruszane w literaturze – w różny sposób w zależności od wykorzystanych algorytmów metodyki czy badanego środowiska. Zhu i inni wykazali, że w złożonym środowisku są w stanie uzyskać średni błąd położenia wynoszący 3,015 m [17]. Duong-Bao i inni uzyskali z kolei średni błąd lokalizacji równy 1,71 m [18]. Zastosowanie innych danych poza RSSI,

w połączeniu z sieciami neuronowymi, pozwala osiągnąć dokładność lokalizacji na poziomie centymetrowym [19].



Rysunek 7. Histogram błędów położenia dla zestawu testowego, wagi = *distance*, $k = 7$

Źródło: opracowanie własne.



Rysunek 8. Położenia rzeczywiste i estymowane dla zestawu testowego, wagi = *distance*, $k = 7$

Źródło: opracowanie własne.

Uzyskane rezultaty, w zależności od przyjętych kryteriów, mogą nie gwarantować zadowalającej dokładności lokalizacji, choć na tle literatury przedmiotu wyniki nie odbiegają w znaczący sposób od uzyskanych przez innych badaczy, zwłaszcza

przy uwzględnieniu faktu zastosowania samego wskaźnika mocy odebranego sygnału. Biorąc pod uwagę średnie wartości błędów lokalizacji oraz rozmiary analizowanego obszaru, należy uznać, że rozwiązanie takie może służyć jako detekcja sektora. Wykorzystanie klasyfikacji z użyciem algorytmu k-NN pozwala przypuścić, iż przeskalowanie mapy sygnałów do większego obszaru pozwoliłoby na uzyskanie zbliżonych błędów lokalizacji, lecz w większym obszarze roboczym, co miałoby większą wartość praktyczną. Warto zwrócić uwagę również na to, że wartości błędów są uwarunkowane także gęstością siatki pomiarów wykorzystanych do opracowania mapy sygnałów. W momencie, gdy punkt testowy znajduje się między dwoma punktami na mapie sygnałów, zostanie on przypisany do najbliższego, zatem zagęszczenie siatki pomiarowej mogłoby zredukować wartości błędów.

6. Podsumowanie

W niniejszym artykule zostały przedstawione wyniki badań eksperymentalnych dotyczących określania lokalizacji robota mobilnego z wykorzystaniem pomiarów mocy odebranego sygnału.

Wyniki analizy wskazują na możliwość estymacji lokalizacji z wykorzystaniem algorytmu k-NN jako klasyfikatora. Dokładność uzyskanych wyników charakteryzuje się dużą zmiennością między poszczególnymi próbami.

Dalsze prace będą prowadzone w celu udoskonalenia metody opracowywania mapy sygnałów, redukcji wpływu zjawisk wielodrogowości i interferencji, a także stworzenia skuteczniejszych modeli lokalizacyjnych. Badania te pozwolą na poprawę jakości opracowywanych technik.

Podziękowania

Badania zostały zrealizowane w ramach pracy nr WI/WE-IA/6/2024 w Politechnice Białostockiej i sfinansowane z subwencji badawczej przekazanej przez ministra właściwego do spraw nauki.

Literatura

- [1] Leitch, S. G., Ahmed, Q. Z., Abbas, W. B., Hafeez, M., Laziridis, P. I., Sureephong, P., Alade, T. (2023). On indoor localization using WiFi, BLE, UWB, and IMU technologies. *Sensors*, 23(20), 8598. <https://doi.org/10.3390/s23208598>
- [2] Zafari, F., Gkelias, A., Leung, K. K. (2019). A survey of indoor localization systems and technologies. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 21(3), 2568–2599. <https://doi.org/10.1109/COMST.2019.2911558>
- [3] Yang, T., Cabani, A., Chafouk, H. (2021). A survey of recent indoor localization scenarios and methodologies. *Sensors*, 21(23), 8086. <https://doi.org/10.3390/s21238086>

- [4] Brena, R. F., García-Vázquez, J. P., Galván-Tejada, C. E., Muñoz-Rodríguez, D., Vargas-Rosales, C., Fangmeyer, J. (2017). Evolution of indoor positioning technologies: A survey. *Journal of Sensors*, 6, 359. <https://doi.org/10.1155/2017/2630413>
- [5] Hailu, T. G., Guo, X., Si, H., Li, L., Zhang, Y. (2024). Theories and methods for indoor positioning systems: A comparative analysis, challenges, and prospective measures. *Sensors*, 24(21), 6876. <https://doi.org/10.3390/s24216876>
- [6] Santoro, L., Nardello, M., Brunelli, D. (2023). UWB-based indoor positioning system with infinite scalability. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 72. <https://doi.org/10.1109/TIM.2023.3282299>
- [7] Xue, H., Li, L., Wen, P., Zhang, M. (2023). A machine learning-based positioning method for poultry in cage environments. *Computers and Electronics Agriculture*, 208(C), 107764. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2023.107764>
- [8] Rathnayake, R. M. M. R., Maduranga, M. W. P., Tilwari, V., Dissanayake, M. B. (2023). RSSI and machine learning-based indoor localization systems for smart cities. *Eng*, 4(2), 1468–1494. <https://doi.org/10.3390/eng4020085>
- [9] Bluetooth®. (n.d.). Bluetooth® Direction Finding. Retrieved May 7, 2025, from: <https://www.bluetooth.com/learn-about-bluetooth/feature-enhancements/direction-finding>
- [10] Friis, H. T. (1946). A note on a simple transmission formula. *Proceedings IRE*, 34(5), 254–256. <https://doi.org/10.1109/JRPROC.1946.234568>
- [11] Erceg, V., Parkoff, S. R., Gupta, A., Kulic, B., Julius, A. A., Bianchi, R. (1999). An empirically based path loss model for wireless channels in suburban environments. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*.
- [12] Kulozik, J., Jarrassé, N. (2024). *Evaluating the precision of the HTC VIVE Ultimate Tracker with robotic and human movements under varied environmental conditions*, arXiv:2409.01947. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2409.01947>
- [13] Kaweck, R., Hausman, S., Korb, P. (2022). Performance of fingerprinting-based indoor positioning with measured and simulated RSSI reference maps. *Remote Sensing*, 14(9), 1992. <https://doi.org/10.3390/rs14091992>
- [14] Wang, J., Park, J. (2021). An enhanced indoor positioning algorithm based on fingerprint using fine-grained CSI and RSSI measurements of IEEE 802.11n WLAN. *Sensors*, 21(8), 2769. <https://doi.org/10.3390/s21082769>
- [15] Merker, S., Pastel, S., Bürger, D., Schwadtke, A., Witte, K. (2023). Measurement accuracy of the HTC VIVE Tracker 3.0 compared to Vicon System for generating valid positional feedback in virtual reality. *Sensors*, 23(17), 7371. <https://doi.org/10.3390/s23177371>
- [16] 1.6. *Nearest Neighbors*. (n.d.). scikit-learn. Retrieved May 7, 2025, from: <https://scikit-learn.org/stable/modules/neighbors.html>

- [17] Zhu, Q., Xiong, Q., Wang, K., Lu, W., Liu, T. (2020). Accurate WiFi-based indoor localization by using fuzzy classifier and MLPs ensemble in complex environment. *Journal of the Franklin Institute*, 357(3), 1420–1436. <https://doi.org/10.1016/j.jfranklin.2019.10.028>
- [18] Duong-Bao, N., He, J., Thi, L. N., Nguyen-Huu, K., Lee, S.-W. (2022). A novel valued tolerance rough set and decision rules method for indoor positioning using WiFi fingerprinting. *Sensors*, 22(15), 5709. <https://doi.org/10.3390/s22155709>
- [19] Koike-Akino, T., Wang, P., Pajovic, M., Sun, H., Orlik, P. V. (2020). Fingerprinting-based indoor localization with commercial MMWave WiFi: A deep learning approach. *IEEE Access*, 8, 84879–84892. <https://doi.org/10.1109/access.2020.2991129>

Deepfakes in contemporary information warfare: Regulatory challenges and implications for global security

Kinga Niemiec

Faculty of Law and Administration

University of Warsaw

kinganiemiec@icloud.com

Abstract: This article explores the growing role of deepfake technology in contemporary information warfare, focusing on legal, ethical, and technological challenges. Through case studies and regulatory comparisons, it highlights the threat deepfakes pose to democratic institutions and public trust, and proposes legal, technical, and educational countermeasures to ensure responsible governance of synthetic media.

Key words: deepfakes, disinformation, AI regulation, information warfare, media ethics

1. Introduction

In the face of rapid technological advancement, deepfake technology has emerged as one of the most controversial yet intriguing phenomena of contemporary times. It enables the creation of highly realistic, yet entirely fabricated, images, audio recordings, and video materials through, the use of advanced artificial intelligence algorithms – particularly neural networks and Generative Adversarial Networks (GAN) [1]. Although initially developed within academic circles as a research experiment and a tool of artistic expression, deepfake technology has gradually found applications far beyond these original contexts – evolving into a medium with vast influential potential, increasingly used for disinformation, propaganda, and information warfare operations [2].

The aim of this article is to provide an interdisciplinary analysis of selected aspects of the deepfake phenomenon, with particular emphasis on its origins, use in manipulative practices, and regulatory challenges. It will present both the technical foundations underlying the development of this technology and its broader social and legal implications, including proposals for responsible legislative and policy responses. The conclusions drawn in the final chapter are intended to serve as a starting point for further reflection on the necessity of global cooperation in countering the misuse of generative technologies [3].

Deepfake technology poses a tangible threat to core democratic institutions, the integrity of electoral processes, and to broadly defined security both at the national and international levels. In a world where the boundaries between what is real and what is fabricated are becoming increasingly blurred, public trust in the media, governmental authorities, and international organizations is steadily eroding. This environment creates fertile ground for actors seeking to destabilize the existing informational and political order [4].

The analysis presented in this study is based on a comprehensive review of relevant literature, case studies of real-world applications of deepfake technology, and a comparative assessment of regulatory models and legislative initiatives developed in response to its rapid advancement. A particularly important contribution is the work by Shoaib, Wang, Ahvanooey, and Zhao, titled *Deepfakes, Misinformation, and Disinformation in the Era of Frontier AI, Generative AI, and Large AI Models* (2023), published on the arXiv platform. The authors highlight that generative AI models – such as GANs and diffusion models, can be deployed to produce disinformation content at scale, significantly complicating efforts to detect and counteract narratives built on falsehoods [5]. This publication serves as a foundation for both theoretical considerations and practical conclusions regarding the social and legal implications of deepfake technology development.

Throughout the analysis, several key questions will be posed: What are the principal threats posed by the use of deepfakes in the context of global security? What challenges do legal systems face amid the accelerating generativity of media? Is it possible to effectively detect and mitigate the harm caused by the dissemination of manipulated visual and audio content? Attempting to answer these questions will provide the basis for a broader reflection on the future of legal regulation and the responsible governance of emerging technologies in the era of post-truth.

2. Origins and development of deepfake technology

Deepfake technology, which has garnered increasing attention from the academic community, policymakers, and practitioners alike, represents a sophisticated method of generating synthetic visual and audio content through artificial intelligence. It operates primarily on the basis of **deep learning techniques**, which allow for the creation of hyper-realistic images, videos, and audio recordings often nearly indistinguishable from authentic audiovisual materials [6].

A pivotal role in the development of this technology has been played by Generative Adversarial Networks (**GANs**) dual-component neural network architectures in which one part, the *generator*, produces synthetic data, while the other, the *discriminator*, evaluates its authenticity. This dynamic of mutual competition between the two networks results in the progressive enhancement of the realism of generated content, thereby leading to a continuous improvement in the quality of deepfake outputs [7].

Complementing GANs are techniques based on autoencoders, particularly their variants known as Variational Autoencoders (VAEs). These models enable efficient encoding and reconstruction of facial images, thereby facilitating real-time manipulation of facial expressions or the replacement of one person's face with another's. Another significant component in the evolution of deepfake technology includes lip-syncing and voice cloning techniques. Models such as *Wav2Lip* and *Describe Overdub* allow for the precise replication of vocal characteristics such as timbre, rhythm, and intonation and their synchronization with lip movements. These tools achieve a level of realism that is often indistinguishable to the human eye and ear [8]. These processes are further supported by **style transfer and visual morphing techniques**, which allow for more refined adaptation of facial expressions and characteristic features of the person depicted in the footage.

In recent years, the entry threshold for creating deepfakes has significantly decreased. While the technology initially required access to specialized hardware such as high-performance graphic processors or cloud infrastructure today, the creation of deepfakes has become widely accessible. This is largely due to the proliferation of open-source tools (such as *DeepFaceLab*, *FaceSwap*, and *Avatarify*) and user-friendly applications, which enable even individuals with no advanced technical expertise to generate convincing synthetic content [9].

This rapid advancement has led to a significant improvement in the quality of generated content. Early deepfake attempts were often marred by visual inaccuracies, including artifacts, lighting inconsistencies, and unnatural facial expressions. In contrast, contemporary deepfakes – developed using refined neural network architectures and transfer learning techniques can be virtually indistinguishable from authentic audiovisual materials, even to trained experts or specialized detection systems [10].

The high level of realism achieved by current deepfake content raises a number of serious concerns regarding the boundaries of creator responsibility, the potential for misuse, and the urgent need for effective detection mechanisms and legal regulation. In this context, an in-depth technological analysis becomes a crucial step toward developing effective strategies to counteract the risks and abuses associated with the advancement of deepfake technology.

3. Deepfakes as an instrument of disinformation and manipulation

As deepfake technology becomes increasingly accessible and realistic, its use for disinformation purposes is growing rapidly. Synthetic images and videos, generated using advanced artificial intelligence algorithms, are now frequently employed in influence campaigns – both political and social. Consequently, this technology

has moved beyond being merely a technical challenge, emerging instead as a tangible threat to the foundations of democracy and transparent public communication.

A particularly noteworthy example occurred during the Russian invasion of Ukraine in 2022. At that time, a video circulated on social media purportedly depicting President Volodymyr Zelensky calling on Ukrainian soldiers to surrender. Although the material was quickly identified as a deepfake, its very presence in the information space highlighted the disruptive potential of this technology to spread disinformation, incite public anxiety, and undermine the morale of both the civilian population and the armed forces [11].

Equally alarming are instances of deepfake use in the context of electoral processes. Fabricated videos, in which politicians appear to make controversial or compromising statements, can be disseminated at lightning speed via social media platforms. Such actions enable the manipulation of voters' emotions, deepen societal divisions, and erode the credibility of democratic institutions [12].

Complementing these threats is the phenomenon known as the "liar's dividend". This term refers to situations in which even authentic audiovisual recordings can be dismissed as potential fabrications. Such a scenario allows public figures to deny credible evidence of their actions, thereby contributing to the relativization of truth and the growing public skepticism toward all forms of media content [13].

Deepfake technology is now being employed on a large scale, and the aforementioned cases vividly demonstrate that its associated threats extend far beyond technical concerns. They touch upon fundamental aspects of social life, including public trust, the quality of democratic discourse, and the accountability of institutions. In light of these challenges, it is essential not only to enhance detection tools for synthetic content but also to engage in a broad-based discussion on the ethical, legal, and societal dimensions of artificial intelligence in the public sphere.

4. Regulatory Challenges: An Overview of Global Initiatives

In response to the growing threat posed by the proliferation of deepfake technology, individual states and international organizations have undertaken efforts to regulate its application. Legislative challenges include both the creation of new legal provisions and the adaptation of existing frameworks, which must account for the dynamic nature of technological development, the global reach of the internet, and the inherent difficulties in legal enforcement.

In the United States, several legislative initiatives have emerged to address deepfakes. One such proposal is the *No Fakes Act*, which criminalizes the commercial use of a person's likeness without consent through generative technologies. Another significant proposal is the *Deepfakes Accountability Act*, which mandates the labeling of AI-generated content and introduces penalties for the unauthorized distribution of misleading synthetic media [14].

The European Union has also addressed the regulation of deepfakes within the broader framework of the AI Act. This legislative proposal classifies artificial intelligence systems based on their level of risk, with deepfakes identified as applications requiring a high degree of transparency. As a result, the Act imposes a clear obligation to label such content as artificially generated, ensuring that viewers are explicitly informed about the synthetic nature of the media they encounter [15]. The aim of this regulatory approach is to ensure that audiences are made aware of the artificial nature of specific content, thereby helping to prevent manipulation and the spread of disinformation.

Correspondingly, China has implemented regulations concerning "internet information synthesized using deep learning and virtual reality technologies". These provisions require all content generated with deepfake technology to be clearly labeled, and explicitly prohibit the use of such technology in ways that may destabilize society or undermine public order [16]. Chinese authorities have also taken the position that digital platforms bear responsibility for monitoring and removing harmful deepfake content.

Legal debate increasingly shows that responding to the challenges of deepfake technology cannot rely on isolated legal provisions alone. In Chesney and Citron's view, effective regulation calls for liability frameworks that hold accountable both those who intentionally create synthetic media and those who, through negligence, enable its distribution [3]. Kapoor points out that effective regulation should draw on several branches of law at once – data protection, defamation, and electoral law – since the risks of deepfakes cut across multiple legal domains [12]. At the same time, Mirsky and Lee stress that even the most sophisticated legal norms will prove insufficient unless they are coupled with binding obligations for platforms to implement AI-based detection tools [6]. This view is shared by Verdoliva, who highlights the importance of common forensic standards that could make enforcement more consistent across jurisdictions [11]. This is exemplified by the European AI Act, which combines transparency and labeling duties with incentives for developing reliable verification mechanisms [15]. Together, these perspectives suggest that effective governance of deepfakes requires legal frameworks that are both comprehensive and technologically grounded, with clear duties imposed on digital platforms to operationalize compliance in practice.

Despite these initiatives, the effective enforcement of legal provisions continues to face numerous obstacles. Among the main challenges are the anonymity of internet users, the cross-border nature of digital content, and the lack of sufficient tools to identify the sources of deepfakes. Furthermore, distinguishing between permissible satire or artistic expression and harmful disinformation remains problematic.

The diversity of legislative approaches across the globe highlights the absence of a universal regulatory model. Nevertheless, the need for international cooperation and harmonization of legal frameworks is becoming increasingly evident. Global initiatives, such as the GLOBSEC reports, underscore the importance of a coordinated

response to the complex challenges posed by deepfake technology [17], and underscore the importance of a unified approach to the challenges posed by deepfake technology.

5. Conclusions

Although initially developed for creative purposes in art and entertainment, deepfake technology has rapidly evolved into one of the most pressing challenges for modern information systems, democratic institutions, and public security at large. As demonstrated throughout this article, its impact extends far beyond technical concerns – deepfakes strike at the core of social trust, the integrity of democratic processes, and the protection of fundamental human rights.

In light of the data and case studies examined, it is evident that existing legal frameworks in many jurisdictions are not keeping pace with the advancement of generative technologies. It is therefore urgent to develop and implement comprehensive legislative solutions that balance the need for innovation with the imperatives of security and privacy protection. Among the key recommendations is the adoption of measures similar to the European AI Act in other regions, particularly with regard to mandatory labeling of synthetic content and enhanced enforcement mechanisms.

In parallel with legal reforms, intensified efforts must be made to develop robust detection tools. Investments in AI-driven technologies capable of swiftly and accurately identifying deepfakes should become a priority in public policy strategies aimed at strengthening informational security. These efforts should be complemented by wide-ranging educational programs enhancing media and digital literacy, especially among youth, which may serve as an effective barrier against manipulation and disinformation.

From an academic perspective, further research is needed to understand the social and psychological effects of exposure to synthetic content. Special attention should be given to the long-term influence of deepfakes on the perception of reality, institutional trust, and political decision-making processes. Simultaneously, it is vital to develop an integrated approach to public policy that merges technological, legal, educational, and ethical dimensions into a coherent strategy against deepfake-related abuses.

Finally, the importance of international cooperation cannot be overstated. Only through coordinated action encompassing the exchange of best practices, common ethical standards, and the development of shared technological tools can meaningful progress be made. Such collaboration must serve as the foundation for further legislative, scientific, and societal initiatives in this field.

Today, deepfake technology represents one of the most influential and unpredictable tools of the modern infosphere. Addressing the risks it poses requires a resolute,

multidimensional, and coordinated response made up of technological safeguards to confront the civilizational challenges of the digital era.

Literature

- [1] Goodfellow, I., Pouget-Abadie, J., Mirza, M., Xu, B., Warde-Farley, D., Ozair, S., Courville, A., Bengio, Y. (2014). *Generative adversarial networks*, arXiv:1406.2661. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1406.2661>
- [2] Westerlund, M. (2019). The emergence of deepfake technology: A review. *Technology Innovation Management Review*, 9(11).
- [3] Chesney, R., Citron, D. K. (2019). Deep fakes: A looming challenge for privacy, democracy, and national security. *California Law Review*, 107(6), 1753–1819.
- [4] Schick, T., Schütze, H. (n.d.). *Exploiting deepfakes: A review of detection techniques and social challenges*, arXiv:2107.06456
- [5] Shoaib, M. R., Wang, Z., Ahvanooey, M. T., Zhao, J. (2023). *Deepfakes, misinformation, and disinformation in the era of frontier AI, generative AI, and large AI models*, arXiv:2307.0130. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2311.17394>
- [6] Mirsky, Y., Lee, W. (2021). The creation and detection of deepfakes: A survey. *ACM Computing Surveys*, 54(1), 1–41.
- [7] Goodfellow, I., Pouget-Abadie, J., Mirza, M., Xu, B., Warde-Farley, D., Ozair, S., Courville, A., Bengio, Y. (2014). Generative adversarial nets, advances in neural information processing systems. *Advances in Neural Information Processing Systems*, 3(11), arXiv:1406.2661. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1406.2661>
- [8] Kingma, D. P., Welling, M. (2022). *Auto-encoding variational Bayes*, arXiv:1312.6114. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1312.6114>
- [9] Prajwal, K. R., Mukhopadhyay, R., Namboodiri, V., Jawahar, C. V. (2020). Lip-syncing GANs for audio-to-video generation. *IEEE CVPR*.
- [10] Korshunov, P., Marcel, S. (2018). *Deepfakes: A new threat to face recognition? Assessment and detection*, arXiv:1812.08685. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1812.08685>
- [11] Verdoliva, L. (2020). Media forensics and deepfakes: An overview. *IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing*, 14(5), 910–932.
- [12] Kapoor, A. (2024). *Study of deepfakes and misinformation*. SSRN.
- [13] Global Solutions Initiative. (2023). *Deepfakes and the disinformation ecosystem*.
- [14] AP News. (2023). *US Senators propose No Fakes Act to curb AI misuses*. <https://apnews.com/article/artificial-intelligence-deepfakes-congress-biden-7026e6223c64a042bd434b11c211b753>
- [15] European Commission. (2023). *Proposal for a regulation on artificial intelligence (Artificial Intelligence Act)*. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A32024R1689>
- [16] Digichina. (2022). *Translation: Internet information service deep synthesis management provisions (draft for comment) – Jan. 2022. Draft rules would require*

labels, content controls for synthetic media. <https://digichina.stanford.edu/work/translation-internet-information-service-deep-synthesis-management-provisions-draft-for-comment-jan-2022>.

- [17] GLOBSEC. (2024). *Regulating deepfakes: Global approaches to combatting AI-driven manipulation.* <https://www.globsec.org/what-we-do/publications/regulating-deepfakes-global-approaches-combatting-ai-driven-manipulation>

Design and 3D printing of biodegradable scaffolds from PLA based material

Tomáš Balint, Miroslav Kohan, Jozef Živčák, Radovan Hudák*

Department of Biomedical Engineering

Faculty of Mechanical Engineering

Technical University of Košice

**tomas.balint@tuke.sk*

Abstract: 3D printing plays a key role in the field of biomedical engineering. Nowadays, there is an increasing focus on environmentally sustainable solutions. In tissue engineering and regenerative medicine, one of the most important aspects is the development of biodegradable scaffolds. Such scaffolds serve as a matrix and support for cells, allowing them to grow and differentiate, thereby aiding tissue regeneration. Using 3D printing of such scaffolds, we can more precisely control their structure and properties, which increases the accuracy and efficiency of the regeneration process.

Key words: FDM method, additive technology, biodegradable scaffolds, PLA material

1. Introduction

The aim of this article is to design and optimize the process of creating biodegradable scaffolds for tissue engineering using 3D printing technology from polylactic acid (PLA)-based material. The article focuses on the design of appropriate scaffold geometry, selection of 3D printing parameters, and experimental verification of the mechanical properties of the printed structures in order to ensure their functionality and biodegradability in biomedical applications.

A bone scaffold is a three-dimensional structure that can be used to regenerate damaged bone. The scaffold can be a substitute for cell adhesion, cell division, cell proliferation, cell growth, and changes in the shape of the tissue in which the tissue has been cultured. The cultured cells grow and enlarge. They are then implanted into the area to be replaced, and the cells on the scaffold subsequently form new tissue to replace the primary tissue. At the same time, the scaffold degrades in the body. Important properties of scaffolds are that they must be biocompatible, immune-resistant, and stimulate the body's immune system. Scaffolds should have appropriate mechanical properties for each part of the bone's function, and be strong enough to function from implantation until the remodeling process is complete [1, 2].

Materials that can be used to make a bone scaffold must be non-toxic, biocompatible, and in some cases biodegradable. The materials must form a three-dimensional

structure similar to the replacement organ. The bone scaffold can be prepared from ceramics, bioactive glasses, metals, polymers, composites. The bone scaffold must have a suitable architecture and sufficient porosity with an appropriate size. Three-dimensional (3D) printing using a fused filament fabrication (FFF) system is an excellent technique for preparing bone scaffolds due to its low cost and ease of production. Complex structures can be easily created using FFF 3D printing [3, 4].

2. FDM (Fused deposition modeling) technology

FDM (Fused deposition modeling) or FFF (Fused Filament Fabrication) is a 3D printing technology used for modeling, prototyping, and final products. This type of 3D printing is the most widely used worldwide. Additive manufacturing technologies are rapidly advancing in the current environment [5]. Among the various three-dimensional (3D) printers designed for different materials, Fused-Deposition Modeling (FDM) stands out as a widespread choice for prototyping and manufacturing plastic components. In this innovative process, filaments are subjected to controlled melting through a dynamic nozzle, strategically deposited layer by layer on a surface to create a shape that is predetermined [6, 7].

FDM has attracted engineers and scientists greatly in recent years because of its wide scope, non-toxic materials, convenient operation, high production efficiency, low maintenance, simple equipment structure, easy operation, and also high strength and toughness of materials [8, 9].

It uses the technique of extruding heated plastic filaments through a nozzle tip by depositing layers onto a platform to build parts layer by layer directly from a pre-prepared digital model. The pattern for each layer is controlled by mechanical manipulation of the x-y position of the nozzle and can be different or arbitrary for each layer deposited. Fused deposition modeling (FDM) is one of the most widely used additive manufacturing processes for the production of prototypes and functional parts. The FDM process is also widely used in the research and development sectors for process improvement, development of new materials, and application of FDM systems in a wide range of engineering applications [10].

3D printers that operate on FDM technology consist of a printer platform, a nozzle (also called a print head), and a raw material in the form of a filament. The printer substrate is usually made of metal, ceramic, or hard plastic, and each subsequent layer is deposited on this substrate. The printer nozzle is attached to a mechanical base that uses a system of belts and/or lead screws for movement. The entire extruder assembly can be moved in the X, Y, and Z dimensions using a motorized system. A fourth motor, called a stepper motor, is used to advance the thermoplastic material into the nozzle. All head movements are controlled by a computer. Materials commonly used in FDM include:

- PLA – Polylactic Acid
- ABS – Acrylonitrile Butadiene Styrene

- PC – Polycarbonate
- PET-G – Polyethylene Terephthalate – Glycol
- PVA – Polyvinyl Alcohol

3. Methodology for additive manufacturing of biodegradable scaffolds

We produced the filament at the Technical University of Košice – Faculty of Mechanical Engineering, Department of Biomedical Engineering and Measurement. We made the filament from the input material in the form of PLA/PHB pellets + plasticizer (25%). The production itself was carried out on the Filament Maker Composer 450 device from 3Devo (Figure 1). The production parameters can be seen in Table 1.

Table 1. Specifications

Product specifications	
Maximum temperature	450 °C
Compatible materials	PLA, ABS, PC, PS, PETG, TPU, TPE, PPS, PVA, Bio PE, NEW PET, PA (6,12, 66), PEEK, PC, PS, PEKK, PAEK, PEI, PSU, PES, PTFE , PVD+
Hopper volume	2 l
Coil Holder	1
Coil size	diameter 240 mm, width 120 mm
Dimensions	506 x 216 x 448 mm
Weight	Extruder 24,5 kg
Heating (thermal) zones	4
Speed range	2 – 15 r./min.

Source: own studies.

Before filament production, the Filament Maker Composer 450 was cleaned with HDPE (high-density polyethylene) material. The pellets (granulate) were dried in a dryer for approximately 3 hours at 60 °C. Filament production works on the principle of extrusion. In this process, the input material (in our case, PLA and PHB pellets + plasticizer in a ratio of 25%) is extruded using pressure and temperature. The Filament Maker Composer 450 from 3Devo has four heat zones, thanks to which the input material in the form of pellets is gradually moved and melted into a filament. The resulting melted filament is wound onto a plastic spool in the form of a filament. The parameters required for extrusion are adjustable using the wheel on the side of the device. The set values are displayed on the display located near the wheel for setting parameters, i.e. on the side of the device. We set the heat zones

for the correct melting process as follows: heat zone no. 1–153 °C, heat zone no. 2–180 °C, heat zone no. 3–180 °C, heat zone no. 4–146 °C. The fans located in the front of the device must be set at the same angle for uniform cooling of the filament. We set the filament diameter to 1.75 mm. The resulting filament can be seen in Figure 2.

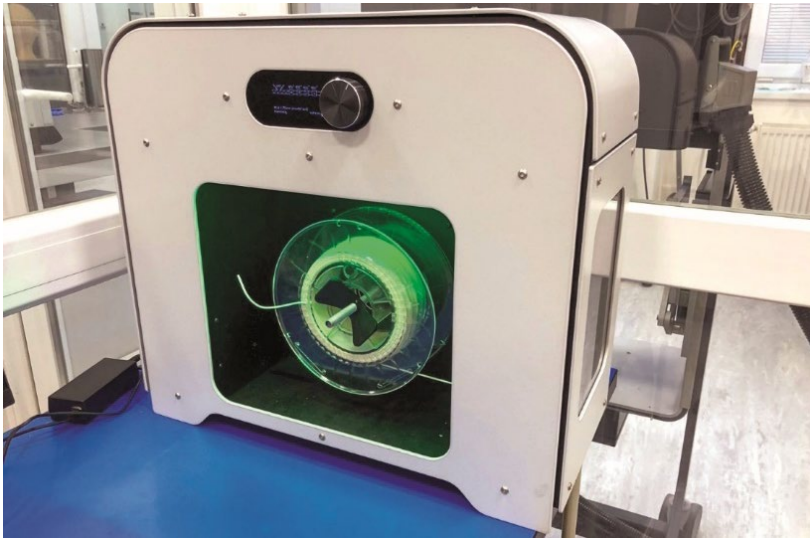


Figure 1. Filament maker

Source: own studies.

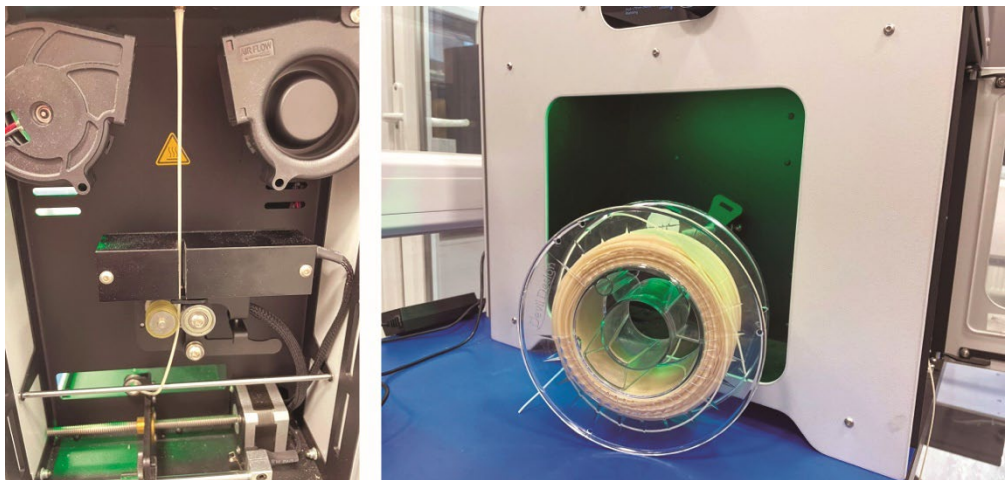


Figure 2. Final product

Source: own studies.

2.1. Design and printing the samples

We designed the samples (Figure 3) in the Solidworks software interface. We then printed the samples using additive technology. The samples were in the shape of a cylinder and we designed their dimensions as follows:

- Diameter: 6 mm
- Height: 2 mm

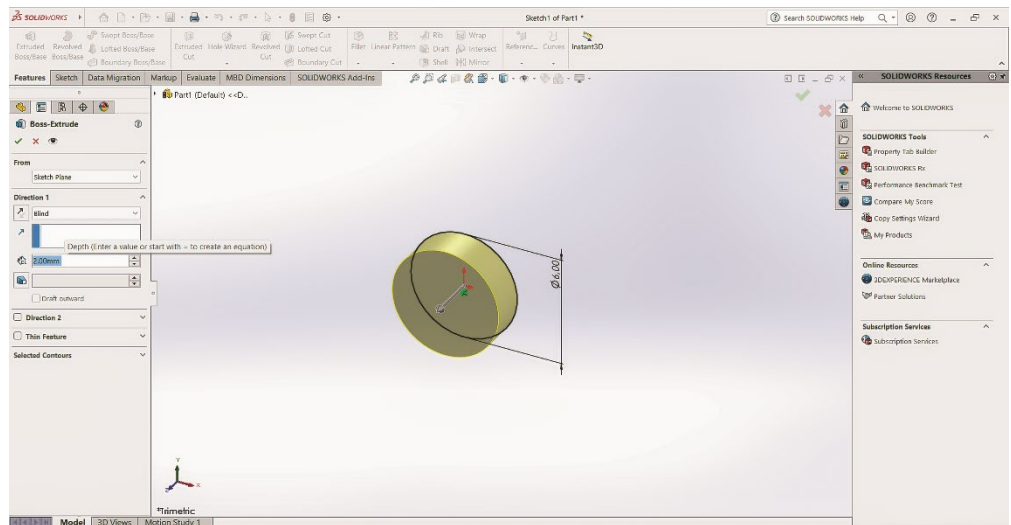


Figure 3. Sample dimensions

Source: own studies.

After modeling in Solidworks, we saved the files in .STL format so that the samples could be prepared for printing.

2.2. Preparing samples for printing

We prepared the samples for printing in the Simplify3D software, where we set the printing parameters for the samples. We set three different infills, namely: 100%, 75% and 50%. Since the material produced is flexible, we set the parameters for the NIMBLE extruder, with which we printed the samples. To speed up the printing of the samples, we also used this software to design the printing of ten samples of each type at once on the platform. The samples modified in this way with the necessary parameters have the resulting format after saving .gcode, for subsequent printing of the samples on a 3D printer. Thanks to this format, the 3D printer is able to recognize the correct printing process. We printed the samples at a temperature of 190 degrees and a plate temperature of 70 degrees. Figure 4 shows the final design of the samples.

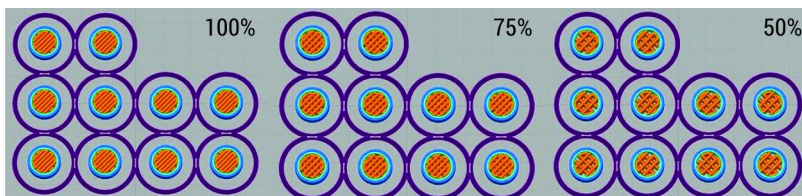


Figure 4. Final design with different infill

Source: own studies.

3. Results

The weight of the resulting filament wound on the spool, together with the spool, was 773.10 g. During the production of the filament, its diameter was recorded in an Excel file at all times. From the recorded values, we created statistical data using descriptive statistics. Descriptive statistics include the maximum and minimum value, in our case max. – 1810, min. – 1710, arithmetic mean – 1754.90, standard deviation – 24.84, range – 100 and sum – 175490. Important data used in descriptive statistics are also: variance – 617.16, which expresses the variability in the set; skewness, which expresses the skewness of the set, and therefore whether the given statistical set is accompanied by high or low values. The skewness in our set is 0.20, which means that if the skewness coefficient is higher than 0, then smaller values prevail and few larger ones – this is a left-skewed distribution. Based on this distribution, it can be said that the produced filament was mostly thinner than the nominal value of 1.75 mm, i.e. the calculated diameter. The kurtosis expresses the distribution of the data in the set, in our case it came out as a negative value. A result less than 0 expresses that the distribution is flatter, i.e. we have many low and high values in the set and they are not close to the average. The printing of the samples was carried out without any major problems. We printed 150 pieces, in the ratio of 50 pieces – 100% infill, 50 pieces – 75% infill, 50 pieces – 50% infill (Figure 5).



Figure 5. 3D printed samples with 100% and 75% infill

Source: own studies.

4. Conclusions

Printing biodegradable scaffolds on a printer using the 3D printing method has significant benefits for science, research and practice. Printing such scaffolds is among the advantages mainly due to the possibility of creating personalized and precise structures suitable for tissue replacement in medicine. Thanks to 3D printed scaffolds, the possibility of faster drug development arises, because such scaffolds provide the possibility of testing effects in a laboratory environment. The biodegradability of scaffolds in the body is a benefit for surgical procedures and can lead to reduced complications and improved treatment outcomes. Printing biodegradable materials provides precision and flexibility in creating complex structures. PLA-based material is biodegradable to a certain extent. This is what motivated us to implement and solve the problem of this thesis.

This article presents an innovative approach to the development of biodegradable scaffolds using additive manufacturing with PLA material, combining optimization of the geometry of the porous structure with a detailed analysis of the technological parameters of 3D printing. The novelty lies in the systematic design of microstructures tailored for cell adhesion and proliferation, as well as in an experiment oriented to the evaluation of the mechanical and biodegradation properties of the printed scaffolds. At the same time, the research provides a methodological framework for the cheap and environmentally friendly production of scaffolds suitable for tissue engineering, thereby expanding the possibilities of personalized regenerative medicine.

The results we have obtained can be of great benefit for practical use in the future. The created biodegradable material has the potential to influence the medical industry in the future. For example, it can improve access to more personalized treatment procedures, with the possible use of the material in the human body for bone tissue regeneration.

Literature

- [1] Mohamed, S., Shamaz, B. H. (2015). Bone tissue engineering and bony scaffolds. *International Journal of Dentistry and Oral Health*, 1(1), 15–20. <https://doi.org/10.25141/2471-657X-2015-1.0001>
- [2] Huang, Y. Z., Xie, H. Q., Li, X. (2020). Scaffolds in bone tissue engineering: Research progress and current applications. In *Reference module in biomedical sciences* (pp. 205–214).
- [3] Guduric, V., Fénelon, M., Catros, S., Fricain, J. C. (2019). Membrane scaffolds for 3D cell culture. In *Current trends and future developments on (bio-) membranes. Membrane applications in artificial organs and tissue engineering* (pp. 157–189). Elsevier.

- [4] González-Ausejo, J., Rydz, J., Musioł, M., Sikorska, W., Sobota, M., Włodarczyk, J., Adamus, G., Janeczek, H., Kwiecień, I., Hercog, A., Johnston, B., Khan, H. R., Kannappan, V., Jones, K. R., Morris, M. R., Jiang, G., Radecka, I., Kowalczyk, M. (2018). A comparative study of three-dimensional printing directions: The degradation and toxicological profile of a PLA/PHA blend. *Polymer Degradation and Stability*, 152, 191–207. <https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2018.04.024>
- [5] Apaçoğlu-Turan, B., Kırkköprü, K., Çakan, M. (2024). Numerical modeling and analysis of transient and three-dimensional heat transfer in 3D printing via fused-deposition modeling (FDM). *Computation*, 12(2), 27. <https://doi.org/10.3390/computation12020027>
- [6] Yu, W., Sun, L., Li, M., Lei, W., Wei, C. (2023). FDM 3D properties PBS/PLA. *Polymers*, 15(21), 4305. <https://doi.org/10.3390/polym15214305>
- [7] Varma, M. V., Kandasubramanian, B., Ibrahim, S. M. (2020). 3D printed scaffolds for biomedical applications. *Materials Chemistry and Physics*, 255, 123642. <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2020.123642>
- [8] Saini, G., Segaran, N., Mayer, J. L., Saini, A., Albadawi, H., Oklu, R. (2021). Applications of 3D bioprinting in tissue engineering and regenerative medicine. *Journal of Clinical Medicine*, 10(21), 4966. <https://doi.org/10.3390/jcm10214966>
- [9] Caddeo, S., Boffito, M., Sartori, S. (2017). Tissue engineering approaches in the design of healthy and pathological *in vitro* tissue models. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*, 5, 40. <https://doi.org/10.3389/fbioe.2017.00040>
- [10] Han, F., Wang, J., Ding, L., Hu, Y., Li, W., Yuan, Z., Guo, Q., Zhu, C., Yu, L., Wang, H., Zhao, Z., Jia, L., Li, J., Yu, Y., Zhang, W., Chu, G., Chen, S., Li, B. (2020). Tissue engineering and regenerative medicine: Achievements, future, and sustainability in Asia. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*, 8, 83. <https://doi.org/10.3389/fbioe.2020.00083>

Comparative study of conventional and stimuli-responsive hydrogels for bioprinting

Mária Danko*, Jana Hlubeňová, Radovan Hudák, Jozef Živčák

Department of Biomedical Engineering and Measurement

Faculty of Mechanical Engineering

**maria.danko@tuke.sk*

Abstract: This study compares conventional hydrogels (CHs) and stimuli-responsive hydrogels (SRHs) based on rheological, mechanical, biocompatibility, and degradation criteria. CHs, such as alginate, gelatin, and collagen, provide stable viscosity, predictable stiffness, and controlled enzymatic degradation for long-term biomedical use. SRHs, including PNIPAAm- and MeHA-based systems, adapt to temperature, pH, redox, or enzymatic stimuli, enabling controlled shape to change or degradation. Results confirm SRHs' superior functional adaptability but indicate the need to improve their mechanical robustness, printability, and in vivo stability for clinical translation.

Key words: hydrogel, stimuli-responsive hydrogels, 3D bioprinting, crosslinking, bioink, hydrogel mechanics

1. Introduction

Hydrogels are three-dimensional hydrated polymer networks that can absorb and retain large amounts of liquid (e.g., water, buffers, or biological fluids) without dissolving [1, 2]. Their ability to swell is attributed to hydrophilic groups ($-\text{OH}$, $-\text{COOH}$, $-\text{NH}_2$) along the polymer backbone, which bind liquid molecules via hydrogel bonding [3]. Depending on their origin [2, 4], hydrogels can be classified as natural (e.g., alginate, collagen, gelatin), synthetic (e.g., polyethylene glycol (PEG), poly(N-isopropylacrylamide) (PNIPAAm)), or hybrid systems polymers combining both types [3–5]. Crosslinking – either chemical or physical – forms a stable network structure that combines softness and high-water content with mechanical integrity and permeability [3, 6–9]. Figure 1 schematically represents the transition from a monomer (A) to a polymer (B), hydrogel precursor (C), and crosslinked hydrogel (D), illustrating the molecular basis of hydrogel formation and the resulting three-dimensional network [3, 4, 9].

Even when two hydrogels share the same chemical composition, the method and density of crosslinking can drastically alter their properties [10, 11]. Figure 2 shows examples of hydrogels with identical chemical composition but different

crosslinking approaches, leading to distinct elasticity, stiffness, and swelling behaviour. This highlights the crucial role of crosslinking in determining the mechanical and physical characteristics of the final material [6, 7, 12].

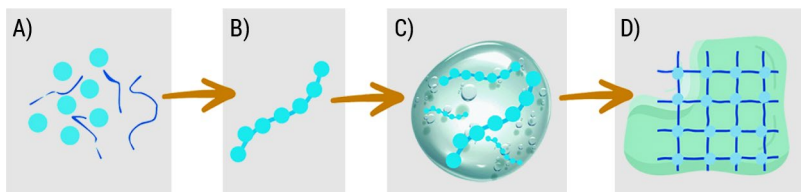


Figure 1. A) Monomer, B) Polymer, C) hydrogel precursor, D) crosslinked hydrogel

Source: own studies.

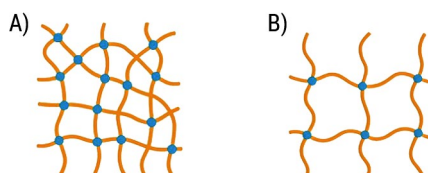


Figure 2. Examples of hydrogels with the same chemical composition, but with different crosslinking methods and mechanical properties: A) Rigid hydrogel: high Young's modulus, dense networks, short chains are interconnected concepts, B) Soft hydrogel: flexible and deformable materials, sparse networks with long chains, connections are rare.

Source: own studies.

Conventional hydrogels (CHs) maintain constant physicochemical properties during application [13]. They offer high biocompatibility, predictable degradation rates, and mechanical stability, but cannot actively respond to changes in their surroundings [4, 8]. In contrast, stimuli-responsive hydrogels (SRHs)—also known as “smart” hydrogels—undergo reversible changes in swelling, stiffness, porosity, or other properties when exposed to triggers such as temperature, pH, enzymes, light, or magnetic fields [9, 10, 14–19]. This responsiveness allows SRHs to more closely mimic dynamic biological environments [9, 20, 21].

Figure 3 summarises the currently known external and internal stimuli that can trigger a response in SRHs, ranging from physical factors such as temperature [14, 17, 19], pH changes [15, 18], and electromagnetic fields [9], to biochemical cues including enzymatic activity [20] and redox reactions [21, 22]. This diversity of possible triggers underlines the versatility of SRHs in designing adaptive biomedical constructs for controlled, on-demand responses [9, 20, 21, 23].

3D bioprinting has become a pivotal technology in tissue engineering, enabling the fabrication of patient-specific scaffolds with precisely defined architecture [1, 10, 13]. While CHs are well-suited for 3D bioprinting applications that require long-term stability and reproducibility, SRHs extend the potential

of the technique into 4D bioprinting – where printed constructs can change shape, mechanical properties, or biological activity over time in response to environmental cues [14, 20, 21].

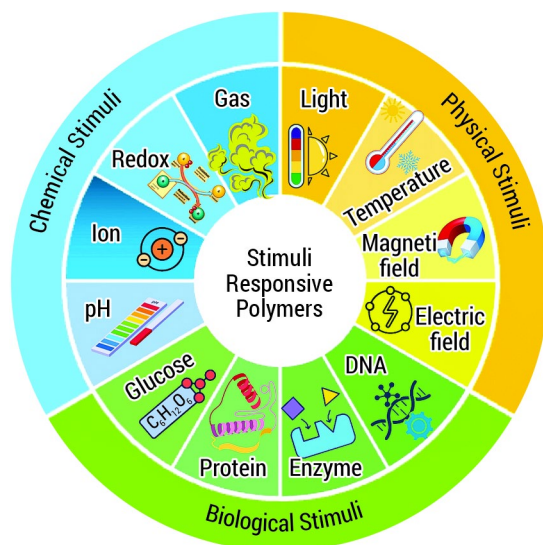


Figure 3. Stimuli-responsive hydrogels

Source: own studies.

This study aims to conduct a systematic comparison of conventional hydrogels (CHs) and stimuli-responsive hydrogels (SRHs) based on six predefined criteria – rheological behaviour, mechanical properties, degradation profile, biocompatibility, adaptability to external and internal stimuli, and suitability for 3D/4D bioprinting – using data extracted from relevant literature sources and standardised evaluation methods.

The working hypothesis is that SRHs, due to their adaptive response to environmental stimuli, demonstrate superior adaptability and broader application potential in dynamic biomedical environments compared to CHs, while maintaining comparable levels of biocompatibility and printability under optimised processing conditions.

2. Methodology

The comparative analysis between conventional hydrogels (CHs) and stimuli-responsive hydrogels (SRHs) was performed according to six predefined evaluation criteria: (1) rheological behaviour, (2) mechanical properties, (3) degradation profile, (4) biocompatibility, (5) adaptability to external and internal stimuli, and (6) suitability for 3D/4D bioprinting. Relevant peer-reviewed articles were identified through

the Web of Science, Scopus, and PubMed databases using combinations of keywords such as “hydrogel”, “stimuli-responsive hydrogel”, “bioprinting”, “rheology”, “mechanical properties”, and “biocompatibility”. Only studies reporting experimental data relevant to at least one of the six evaluation criteria, focused on biomedical applications, and providing sufficient methodological detail for reproducibility were included [3–5, 9, 14, 15, 18, 20, 21, 23].

For the purposes of this work, CHs were defined as hydrogels with physicochemical properties that remain constant under typical biomedical application conditions, without active responsiveness to environmental stimuli [4, 8, 9, 22]. SRHs were defined as hydrogels that exhibit reversible changes in one or more functional properties in response to specific physical, chemical, or biological triggers [9, 14, 15, 17–21].

From each selected study, quantitative and qualitative data were extracted and organised according to the six evaluation criteria [9, 20, 22]. Where applicable, values were normalised to facilitate comparison, for example, rheological measurements converted to Pa·s at comparable shear rates, compressive modulus expressed in kPa, and degradation time in days. Adaptations of existing comparison frameworks [9, 14, 20] were applied to ensure consistency in the assessment.

The parameters assessed included flow behaviour, shear-thinning characteristics, viscosity, and gelation kinetics for rheology [6, 7, 15]; compressive modulus, tensile strength, and elasticity for mechanical properties [5, 12, 16]; enzymatic and hydrolytic degradation rates, swelling ratios, and mass loss for degradation profile [11, 20]; *in vitro* and *in vivo* cytotoxicity, cell proliferation, and inflammatory responses for biocompatibility [4, 8, 24]; responsiveness to temperature [14, 17, 19], pH [15, 18], enzymatic activity [20], and multi-stimuli triggers [21] for adaptability; and printability, shape fidelity, crosslinking compatibility, and stability in printed constructs for suitability in 3D/4D bioprinting [1, 10, 13, 14, 20, 21].

3. Comparison of the properties of conventional hydrogels (CHs) and stimuli-responsive hydrogels (SRHs)

The comparative evaluation of CHs and SRHs was carried out according to the six predefined criteria described in Section 2. CHs were selected to represent widely used, well-characterized systems in biomedical applications, including alginate [1, 4–8, 10, 12], gelatin [1, 4, 8, 11–13], collagen [4, 8, 11, 24], hyaluronic acid-based [4, 8, 11, 24], and PEG-based hydrogels [1, 4–7, 10–12, 24]. SRHs were chosen to represent well-defined, stimuli-responsive systems consistent with the definition provided in the Introduction, specifically PNIPAAm-co-AAc [14, 17–20], methacrylated hyaluronic acid (MeHA) with redox-sensitive crosslinks [15, 20, 21], enzyme-degradable PEG-diacrylate with peptide linkers [20, 21], and light-responsive GelMA–azobenzene hybrids [14, 21].

Table 1 summarises the key characteristics of selected CHs. These hydrogels exhibit predictable rheological profiles [1, 4–8], stable mechanical properties under physiological conditions [5, 10–12], and reliable degradation behaviour [4, 8, 11]. Their high cytocompatibility is well documented [4, 8, 11], and they are widely used in 3D bioprinting due to their shape fidelity and reproducibility [1, 4, 10–12]. However, their inability to actively respond to environmental stimuli [1, 4, 8, 9] limits their functionality in dynamic tissue environments.

Table 1. Comparison of selected conventional hydrogels (not applicable to stimuli) used in 3D/4D bioprinting

CHs (Sources)	Rheological behaviour	Mechanical properties	Biocompatibility & Degradation	Suitability for 3D/4D bioprinting
Alginate [1, 4–8, 10–12]	Shear-thinning; ionically crosslinked, stable viscosity during printing	Compressive modulus ~20–50 kPa (ionically crosslinked)	High cytocompatibility; slow enzymatic degradation; tunable by oxidation/blending	Widely used; high shape fidelity; requires post-crosslinking
Gelatin [1, 4, 8, 11–13]	Thermoreversible gelation; viscosity decreases with temperature	Soft gels (5–20 kPa)	Excellent cell adhesion; rapid enzymatic degradation	Good printability in blends; limited standalone stability
Collagen [4, 8, 11, 24]	Low viscosity; fibrillogenesis at physiological temperature	Soft gels (1–10 kPa)	Native ECM protein; rapid enzymatic degradation	Limited shape fidelity; often reinforced with synthetics
Hyaluronic acid-based [4, 8, 11, 24]	Low intrinsic viscosity; often chemically modified for gelation	Modulus 1–20 kPa depending on crosslinking	Non-immunogenic; enzymatic degradation by hyaluronidase	Printable in blends; low mechanical stability alone
PEG-based hydrogels [1, 4–7, 10–12, 24]	Low inherent viscosity; requires blending; chemically crosslinked	High stiffness (50–150 kPa)	Inert; hydrolytically stable unless degradable linkers added	Limited standalone printability; used in blends

Source: [1, 3, 4, 5, 8–11, 13–17].

Table 2 presents the SRHs selected for this analysis. These materials exhibit reversible changes in mechanical, rheological, or structural properties in response to specific stimuli [14, 15, 17–21], enabling spatiotemporal control over scaffold performance. For instance, PNIPAAm-co-AAc combines temperature and pH responsiveness [14, 17–20], while MeHA with redox-sensitive crosslinks degrades selectively in oxidative environments [15, 20, 21]. Enzyme-degradable PEG-diacrylate scaffolds allow cell-mediated remodelling [20, 21], and light-responsive GelMA–azobenzene hybrids enable precise, non-invasive mechanical modulation [14, 21].

When comparing both groups, CHs remain advantageous for applications requiring predictable, long-term stability [1, 4, 5, 8] and straightforward regulatory approval [4, 24]. SRHs, while often mechanically weaker at rest [14, 15, 17, 20], offer functional adaptability critical for applications such as targeted drug delivery [14, 15, 17, 20, 21], smart tissue scaffolds [14, 15, 20, 21], and dynamic regenerative systems [14, 17, 21]. The primary challenges for SRHs include ensuring consistent printability [14, 17, 20] and maintaining biocompatibility despite the incorporation of responsive moieties [14, 15, 20, 21].

Table 2. Comparison of selected stimuli-responsive hydrogels (SRHs) for 3D/4D bioprinting

SRHs / Adaptability (Sources)	Rheological behaviour	Mechanical properties	Biocompatibility & Degradation	Suitability for 3D/4D bioprinting
PNIPAAm-co-AAc / Temperature & pH [14, 17–20]	Thermoresponsive sol–gel near LCST $\approx 32\text{ }^{\circ}\text{C}$; additional swelling control via pH-sensitive carboxyl groups	Soft gels ($<15\text{ kPa}$) at rest; stiffening above LCST	Cytocompatible; degradability tunable by copolymer ratio; hydrolytically stable unless designed otherwise	Enables temperature- and pH-controlled shape change in 4D printed constructs
Methacrylated hyaluronic acid (MeHA) with redox-sensitive crosslinks – Redox [15, 17, 18, 20, 21, 24]	Shear-thinning; stable viscosity pre-crosslinking; rapid gelation via thiol-disulfide exchange	Modulus $10\text{--}30\text{ kPa}$ depending on crosslink density	High biocompatibility; redox-triggered degradation in oxidative environments	Allows redox-responsive drug release or scaffold degradation
Enzyme-degradable PEG-diacrylate with peptide crosslinkers – Enzymatic [20, 21]	Predictable pre-gel viscosity; stable until enzyme exposure	Modulus $20\text{--}50\text{ kPa}$ pre-degradation; decreases with enzymatic cleavage	Cytocompatible; degradation rate matches protease activity	Suitable for cell-demanded matrix remodeling in tissue engineering
Light-responsive GelMA–azobenzene hybrid – Light [14, 21, 25]	Photo-induced reversible sol–gel transition; viscosity controlled by light wavelength	Tunable stiffness ($10\text{--}40\text{ kPa}$) via reversible photo-crosslinking	Cytocompatible; light-triggered partial degradation	Ideal for spatiotemporal control of scaffold mechanics in 4D printing

Source: [3–6, 8–10, 13–15, 17, 18, 21, 24, 25].

Overall, this comparative analysis confirms the initial hypothesis that SRHs have broader application potential in complex or changing biomedical environments [14, 15, 17–21], provided that their fabrication and biological safety can be optimised.

While conventional hydrogels offer structural support and biocompatibility, SRHs add an important layer of functional responsiveness, making them especially valuable in next-generation biomedical engineering. SRHs are made from natural, synthetic, or hybrid polymers, each chosen for their specific responses to various stimuli (Table 2). Natural polymers, such as chitosan, gelatin, alginate, fibrinogen, and hyaluronan, are appreciated for their biocompatibility and biodegradability [8, 11]. However, they may have drawbacks, including limited mechanical strength and reproducibility. Synthetic polymers, including poly(N-isopropylacrylamide) (PNIPAm) [6], poly(ethylene glycol) (PEG), poly(vinyl alcohol) (PVA), and poly(acrylic acid) (PAA), offer controlled structural and rheological properties, as well as responsiveness to specific stimuli [9]. Nonetheless, these materials often require modifications to enhance biological compatibility. Hybrid SRHs, like gelatin methacrylate (GelMA) [25] crosslinked with PEGDA or chitosan modified with redox-sensitive groups, are engineered to incorporate the advantages of both natural and synthetic polymers

4. Discussion

In the early stages of bioprinting, conventional hydrogels were commonly used because they provide suitable conditions for cell growth, are biocompatible, and allow for easy manipulation. The most frequently used natural polymers include gelatin, alginate, collagen, and agar [1, 4, 8, 10–13], which form gels through physical or ionic bonds. These hydrogels are cost-effective, easy to process, and exhibit the basic rheological properties necessary for extrusion. However, they respond passively to the external environment, and their properties remain stable over time after printing [13].

A more advanced category is stimuli-responsive hydrogels (SRH), which are materials that change their properties – such as shape, viscosity, porosity, and elasticity – in response to specific stimuli like temperature, pH, enzymes, light, gases, or magnetic fields [19]. These hydrogels form the foundation of what is known as 4D bioprinting, where time and environmental conditions actively influence the function of the construct [16, 19].

The present comparative analysis of CHs and SRHs highlights a clear functional divergence between these hydrogel classes. CHs, including alginate, gelatin, collagen, hyaluronic acid-based, and PEG-based systems, remain the dominant choice in biomedical manufacturing due to their predictable rheological profiles, mechanical stability, and proven safety records [1, 4–8, 10–13, 24]. Their clinical track record supports their continued use in applications where property stability and reproducibility are paramount, such as load-bearing tissue scaffolds and regulatory-compliant 3D bioprinting [1, 4, 24].

SRHs introduce a fundamentally different paradigm – one in which scaffold properties dynamically adapt to environmental stimuli such as temperature, pH, redox conditions, enzymatic activity, or light [14, 15, 17–21]. The versatility of systems like PNIPAAm-co-AAc, MeHA with redox-sensitive crosslinks, enzyme-degradable PEG-diacrylate, and light-responsive GelMA–azobenzene enables targeted degradation, shape change, or mechanical modulation *in situ*, offering new possibilities for 4D bioprinting, on-demand drug release [17, 18, 24], and adaptive tissue regeneration [14, 17, 20, 21].

However, this functionality is accompanied by key challenges. SRHs often exhibit lower baseline mechanical strength [14, 15, 17, 20], require more complex synthesis routes, and may present scalability issues in biofabrication [14, 17, 20]. Furthermore, the incorporation of responsive moieties necessitates more extensive safety assessments, including long-term cytotoxicity, immunogenicity, and degradation product profiling [14, 15, 20, 21].

The present comparison integrates data from both experimental results and literature-derived values, which may be influenced by differences in testing conditions across studies. Not all relevant properties, such as *in vivo* performance under dynamic physiological loading or long-term degradation kinetics, could be directly measured in this study. Furthermore, the analysis was limited to a subset of well-characterised CHs and SRHs, meaning other promising systems (e.g., magneto-responsive or electrically conductive hydrogels) were not included.

Future research directions should focus on bridging the gap between the robustness of CHs and the adaptability of SRHs. This includes developing hybrid systems that integrate CHs mechanical stability with SRHs responsiveness; enhancing the mechanical strength of SRHs without impairing their stimuli sensitivity; investigating underexplored stimuli, such as magnetic fields, ultrasound, or biochemical gradients, for biomedical responsiveness; conducting long-term *in vivo* studies to evaluate immune compatibility, stability, and functional integration in host tissues; establishing standardised protocols for rheological and mechanical testing to enable more accurate cross-study comparisons.

5. Conclusions

Conventional hydrogels remain indispensable in biomedical applications for their stability and proven safety, whereas stimuli-responsive hydrogels offer unique adaptability to physiological changes. Our comparison confirms that SRHs provide superior functional versatility for 4D bioprinting and regenerative medicine but require further optimisation of mechanical strength, printability, and long-term biocompatibility for successful clinical translation.

Acknowledgement

The Slovak Research and Development Agency support under contract No. APVV SK-CZ-RD-21-0056 Bioresorbable materials for additive manufacturing of vessel substituents and their biomechanical characterization. This research was supported by project VEGA 1/0387/22 Development and testing of systems for controlled stimulation of cell growth in a bioreactor environment using computer vision. This publication is the result of the projects implementation: CEMBAM – Center for Medical Bioadditive Research and Production, ITMS2014+: 313011V358, Open scientific community for modern interdisciplinary research in medicine (Acronym: OPENMED), ITMS2014+: 313011V455, Center for Advanced Therapies of Chronic Inflammatory Diseases of Locomotion (CPT Zopa), ITMS2014+: 313011W410 and Research and development of intelligent traumatological external fixation systems manufactured by digitalisation methods and additive manufacturing technology (Acronym: SMARTfix), ITMS2014+: 313011BWQ1 supported by the Operational Programme Integrated Infrastructure funded by the European Regional Development Fund.

Literature

- [1] Danko, M., Trebunova, M., Hudak, R., Zivcak, J. (2023). Repeatability and reproducibility of hydrogel 3D bioprinting. *Acta Technologia*, 9(3), 97–101.
- [2] Balon, B. (Ed.). (2024). *Ideas and research of young scientists* (Vol. 1). Slask University of Technology.
- [3] Ahmed, E. M. (2015). Hydrogel: Preparation, characterization, and applications: A review. *Journal of Advanced Research*, 6(2), 105–121.
- [4] Annabi, N., Tamayol, A., Uquillas, J. A., Akbari, M., Bertassoni, L. E., Cha, C., Camci-Unal, G., Dokmeci, M. R., Peppas, N. A., Khademhosseini, A. (2014). 25th anniversary article: Rational design and applications of hydrogels in regenerative medicine. *Advanced Materials*, 26(1), 85–123.
- [5] Zhao, X., Wu, H., Guo, B., Dong, R., Qiu, Y., Ma, P. X. (2017). Antibacterial anti-oxidant electroactive injectable hydrogel as self-healing wound dressing with hemostasis and adhesiveness for cutaneous wound healing. *Bio-materials*, 122, 34–47.
- [6] Haq, M. A., Su, Y., Wang, D. (2017). Mechanical properties of PNIPAM based hydrogels: A review. *Materials Science and Engineering: C*, 70(Pt. 1), 842–855.
- [7] Guvendiren, M., Lu, H. D., Burdick, J. A. (2011). Shear-thinning hydrogels for biomedical applications. *Soft Matter*, 8(2), 260–272.
- [8] Caló, E., Khutoryanskiy, V. V. (2015). Biomedical applications of hydrogels: A review of patents and commercial products. *European Polymer Journal*, 65, 252–267.
- [9] Koetting, M. C., Peters, J. T., Steichen, S. D., Peppas, N. A. (2015). Stimulus-responsive hydrogels: Theory, modern advances, and applications. *Materials Science and Engineering: R: Reports*, 93, 1–49.

- [10] Hospodiuk, M., Dey, M., Sosnoski, D., Ozbolat, I. T. (2017). The bioink: A comprehensive review on bioprintable materials. *Biotechnology Advances*, 35(2), 217–239.
- [11] Li, Y., Rodrigues, J., Tomás, H. (2012). Injectable and biodegradable hydrogels: Gelation, biodegradation and biomedical applications. *Chemical Society Reviews*, 41(6), 2193–2221.
- [12] Zhao, X. (2014). Multi-scale multi-mechanism design of tough hydrogels: building dissipation into stretchy networks. *Soft Matter*, 10(5), 672–687.
- [13] Gungor-Ozkerim, P. S., Inci, I., Zhang, Y. S., Khademhosseini, A., Dokmeci, M. R. (2018). Bioinks for 3D bioprinting: An overview. *Biomaterials Science*, 6(5), 915–946.
- [14] Liu, W. et al. (2020). 3D printing of responsive hydrogel bioinks for tissue engineering applications. *Acta Biomaterialia*, 111, 1–20.
- [15] Afzal, S., Maswal, M., Dar, A. A. (2018). Rheological behavior of pH responsive composite hydrogels of chitosan and alginate: Characterization and its use in encapsulation of citral. *Colloids Surf B Biointerfaces*, 169, 99–106.
- [16] Liu, C., Yu, Q., Yuan, Z., Guo, Q., Liao, X., Han, F., Feng, T., Liu, G., Zhao, R., Zhu, Z., Mao, H., Zhu, C., Li, B. (2023). Engineering the viscoelasticity of gelatin methacryloyl (GelMA) hydrogels via small “dynamic bridges” to regulate BMSC behaviors for osteochondral regeneration. *Bioactive Materials*, 25, 445–459.
- [17] Shriky, B., Kelly, A., Isreb, M., Babenko, M., Mahmoudi, N., Rogers, S., Shebanova, O., Snow, T., Gough, T. (2020). Pluronic F127 thermosensitive injectable smart hydrogels for controlled drug delivery system development. *Journal of Colloid and Interface Science*, 565, 119–130.
- [18] Iglesias, N., Galbis, E., Valencia, C., De-Paz, M.-V., Galbis, J. A. (2018). Reversible pH-sensitive chitosan-based hydrogels. Influence of dispersion composition on rheological properties and sustained drug delivery. *Polymers*, 10(4), 392.
- [19] Kobayashi, J., Nakayama, M., Nagase, K. (2025). Molecular design of dynamically thermoresponsive biomaterials. *Science and Technology of Advanced Materials*, 26(1), 2475736.
- [20] Ma, X., Sekhar, K. P. C., Zhang, P., Cui, J. (2024) Advances in stimuli-responsive injectable hydrogels for biomedical applications. *Biomaterials Science*, 12(21), 5468–5480.
- [21] Zhu, J. et al. (2021). Stimuli-responsive hydrogels for dynamic 3D cell culture and biomedical applications. *Chemical Society Reviews*, 50, 10283–10314.
- [22] Peppas, N. A., Bures, P., Leobandung, W., Ichikawa, H. (2000). Hydrogels in pharmaceutical formulations. *European Journal of Pharmaceutics and Biopharmaceutics*, 50(1), 27–46.
- [23] Calvert, P. (2009). Hydrogels for soft machines. *Advanced Materials*, 21(7), 743–756.

- [24] Hoffman, A. S. (2012). Hydrogels for biomedical applications. *Advanced Drug Delivery Reviews*, 64, 18–23.
- [25] Yue, K., Trujillo-de-Santiago, G., Alvarez, M. M., Tamayol, A., Annabi, N., Khademhosseini, A. (2015). Synthesis, properties, and biomedical applications of gelatin methacryloyl (GelMA) hydrogels. *Biomaterials*, 73, 254–271.

Behaviour of sand-gravel mixture in direct shear

Kolawole Kazeem

Faculty of Civil Engineering and Environmental Science

Bialystok University of Technology

kolawole.kazeem@sd.pb.edu.pl

Abstract: The stress-dilatancy of sand-gravel mixtures was investigated during large-scale direct shear tests using established theories. The addition of gravel to sand results in changes in the shearing resistance of the mixture, and the large shear box apparatus leads to non-homogeneity in the shear band. Parameter α in frictional state theory remains zero, but β need to be reduced from 1.4 to 0.5 and 0.8 in 20% gravel and 60% gravel content, respectively. Likewise, parameter b in Bolton's model needs to be modified from 0.8 to 0.4 and 0.55 for 20% and 60% gravel content of the tested mixtures. There is an increase in dilatancy and sand-gravel mixture strength as the gravel content and the relative density increase.

Key words: sand, gravel, direct shear, stress, dilatancy

1. Introduction

The behaviour of sand-gravel mixtures under shear stress is important in the design and analysis of materials used in the construction of embankments, road sub-bases, and foundations. The mechanical behaviour is seriously influenced by the particle breakage and inter-particle interactions between gravel and sand grains [1, 2]. The direct shear is generally used to determine the strength parameters of soil [3, 4]. The minimum diameter or width of the shear box has to be at least ten times the maximum particle size diameter of the tested material [5, 6]. Due to the large diameters of gravel grains in sand-gravel mixtures, a large-scale direct shear apparatus must be used to simulate field conditions [6–9]. Different modifications of the shear box have been developed [5, 6, 11, 12].

Shearing causes changes in volume that directly affect the strength of sand [13]. The stress-dilatancy relationship is mostly used for understanding soil behaviour during shearing and developing models based on its parameters [14]. Several stress-dilatancy theories have been proposed since the work of Taylor [15], with increased agreement between researchers, and the most known are Rowe [16] and Bolton [17]. Bolton [17] analysed 17 different sands and proposed an empirical approach to the relationship between sand strength, frictional angle, dilatancy and relative dilatancy index. Houlsby [18] considered frictional blocks sliding one over another on a rough plane (sawtooth) at an angle ψ (dilation angle) to the horizontal and residual frictional angle (at constant volume or critical state) ϕ_r , acting on the saw teeth.

The Frictional State Concept is used to describe the stress-dilatancy relationship at different stages of shearing for most granular soils [19–21]. The two new parameters of Frictional State Concepts (α and β) [3, 22] can be used to describe the influence of stress level on the stress-dilatancy relationship of sand-gravel mixtures. These stress-dilatancy relationships are correct for most granular soils but need to be modified for certain soils, such as coral sands, soil-rubber mixtures, fibre-reinforced sands, and sand-gravel mixtures [7, 23–27].

Little research has been done on understanding the stress-strain behaviour of sand-gravel mixtures [7, 8]. In this paper, the results of direct shear tests of sand-gravel mixtures published by Hamidi et al. [8] will be analysed by modifying and using the main stress-dilatancy theories [3, 15, 17, 18] to accurately predict the shear strength and dilatancy of the mixture.

2. Stress-dilatancy for direct shear

Taylor [15] pioneered a relationship between frictional angle and dilation known as the flow rule.

$$\delta W = \sigma'_n \delta \varepsilon_v + \tau \delta \gamma = (\tan \phi_r) \sigma'_n \delta \gamma \quad (1)$$

or

$$\tau / \sigma'_n = (\tau / \sigma'_n)_r + (\delta h / \delta s) \quad (2)$$

or

$$\tan \phi_{peak} = \tan \phi_r + \tan \psi \quad (3)$$

where:

$$\tan \psi = -\delta \varepsilon_v / \delta \gamma = \delta h / \delta s \quad (4)$$

$$\tau / \sigma'_n = \tan \phi_{peak} \quad (5)$$

and σ'_n is effective normal stress, $\gamma \varepsilon_v$ – volumetric strain increment, τ – shear stress, $\delta \gamma$ – shear strain increment, ϕ_r – residual friction angle, ψ – dilatancy angle.

Houlsby's [18] relationship between shear stress and normal stress can be expressed as:

$$\tau / \sigma'_n = \tan \phi_{peak} = \tan(\phi_r + \psi) \quad (6)$$

or

$$\phi_{peak} = \phi_r + \psi \quad (7)$$

Bolton's empirical flow rule correlation suggests that any shear strength above the residual shear angle at a critical state is due solely to dilatancy, which occurs as a result of volume expansion and particle rearrangement.

$$\phi_{peak} = \phi_{cv} + b \psi \quad (8)$$

where $b=0.8$ for plane strain (direct shear) in the original equation [17].

Szypcio [3] developed a stress-dilatancy relationship for direct shear.

$$\tan \phi_{peak} = \frac{\tau}{\sigma'_n} = \frac{\sqrt{3} \eta \cos \phi^o \cos \theta}{3 + \eta (\sin \theta - \sqrt{3} \sin \phi^o \cos \theta)} \quad (9)$$

where:

$$\eta = M_b^o - A_b^o (\alpha + \beta D^p) \quad (10)$$

while α and β are the parameters of the Frictional State Concepts (FSC) representing the mode of deformation, and θ being the Lode angle for stress ($\theta = 15^\circ$), $\alpha = 0$ and $\beta = 1.4$, which are for granular soils in plane strain (direct shear for small box) conditions [3, 4]. For sands

$$\phi^o = \phi_r \quad (11)$$

$$M_b^o = (3 \sin \phi^o) / \sqrt{3} \cos \theta - \sin \phi^o \sin \theta \quad (12)$$

For drained conditions:

$$A_b^o = \frac{1}{\cos(\theta - \theta_\varepsilon)} \left\{ 1 - \frac{2}{3} M_b^o \sin \left(\theta + \frac{2}{3} \pi \right) \right\} \quad (13)$$

$$\tan \theta_\varepsilon = \frac{1}{\sqrt{3}} \frac{(\delta h / \delta s)}{\sqrt{1 + (\delta h / \delta s)^2}} \quad (14)$$

$$D^p = \frac{\delta \varepsilon_v}{\delta \varepsilon_q} = -\sqrt{3} \frac{(\delta h / \delta s)}{\sqrt{1 + \frac{4}{3} (\delta h / \delta s)^2}} \quad (15)$$

where the stress ratio (η), volumetric strain increments ($\delta \varepsilon_v$), shear strain increments ($\delta \varepsilon_q$), and the plastic dilatancy (D^p) were calculated using the formulas above.

3. Materials and direct shear tests

The mixture of sub-rounded to sub-angular grains of quartz sands from the shores of the Caspian Sea with rounded gravel grains of maximum grain sizes of 12.5 and 25.4 mm was tested by Hamidi et al. [8]. The gravels were mixed with the sands at 20, 40, and 60 percent by weight. The index properties and grain size distribution curve of the analysed mixture are presented in Table 1 and Figure 1, respectively.

Hamidi et al. [8] conducted a series of consolidated-drained large-scale direct shear tests in a shear box of 300 by 300 by 170 mm on dry samples under surcharge pressures of 150, 300, and 450 kPa and varied relative densities of 35, 60, and 85 percent.

Table 1. Index properties of tested and analysed sand-gravel mixtures

Soil	Maximum grain size (mm)	Morphology	G_s	D_{60} (mm)	D_{10} (mm)	C_u (–)
Sand	1.2	Sub-rounded to sub-angular	2.74	0.28	0.16	1.75
Gravel	12.5	Rounded	2.64	1.14	0.98	1.16

Source: [8].

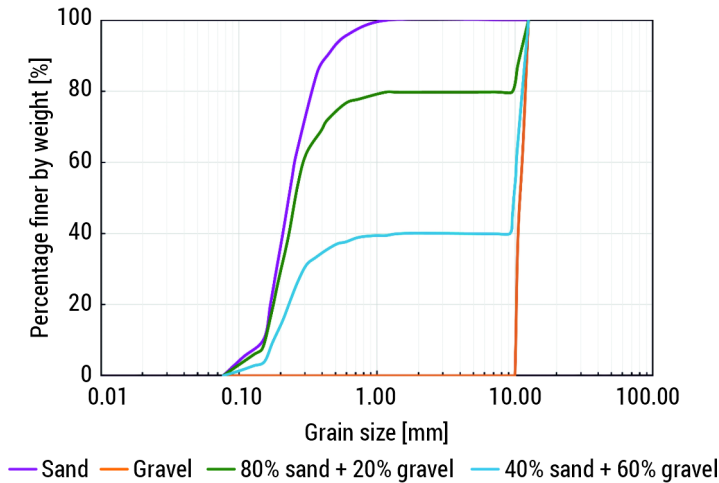


Figure 1. Particle size distribution curves for tested materials

Source: adapted from [8].

In this paper, only experimental test results of gravel content of 20 and 60 percents with a maximum grain size of 12.5 mm and a vertical surcharge pressure of 450 kPa were analyzed. The maximum and minimum void ratios for a 20% gravel mixture are 0.58 and 0.42, respectively, while for a 60% gravel mixture, they are 0.40 and 0.28, respectively.

4. Experimental results

The strength and dilatancy characteristics of sand-gravel mixtures were experimentally tested [8]. The results of the large direct shear box tests of the mixture for 20% and 60% gravel content at 450 kPa vertical surcharge pressure are shown in Figures 2 and 3 and in Table 2. The relationship $\delta v / \delta s - s$ presented in Figures 2c and 3c,

obtained from the direct shear tests, are segmentally calculated using high-degree polynomials.

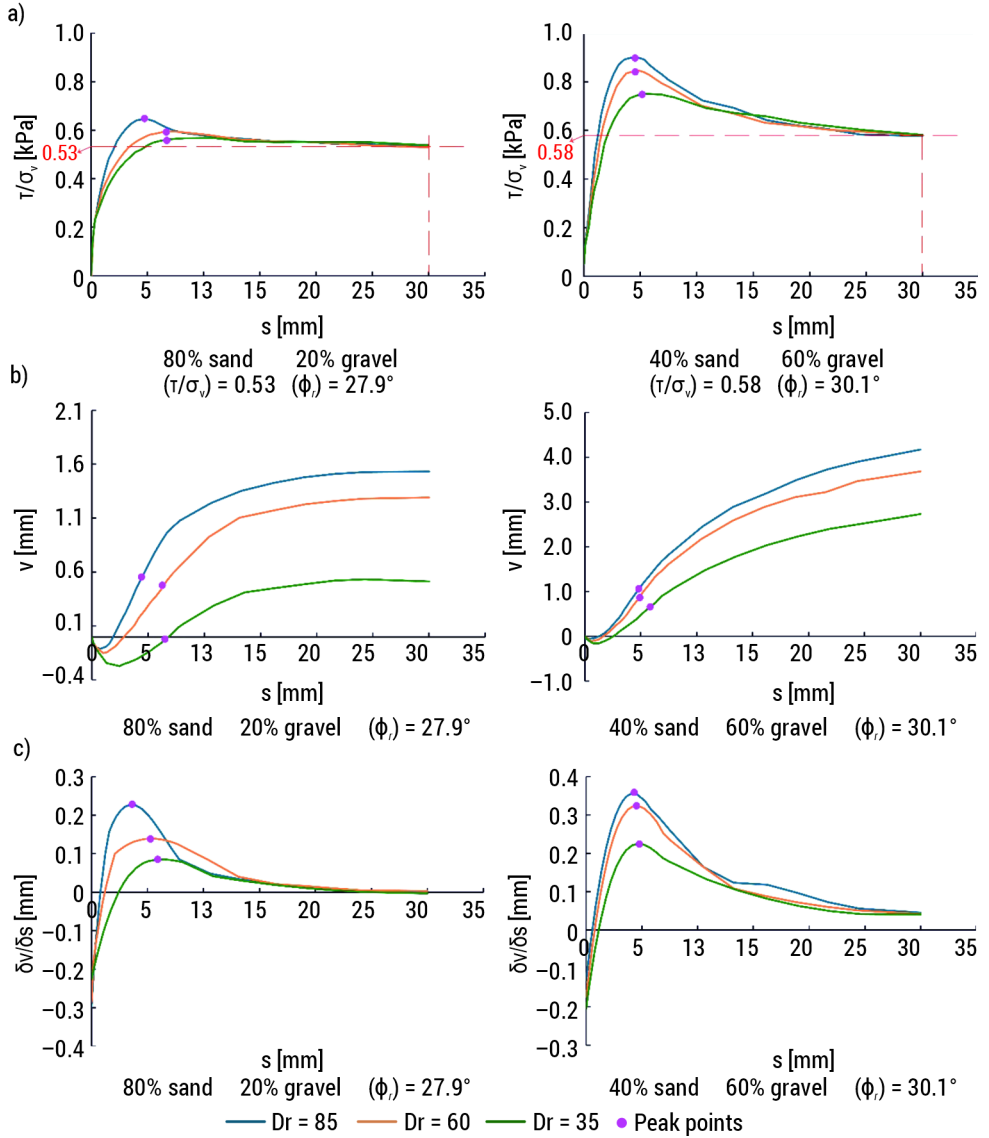


Figure 2. Direct shear test results in a large-scale box on sand mixed with 20% gravel at different relative densities under pressure of 450 kPa in planes: (a) $\tau/\sigma_\xi - s$; (b) $\xi - s$; (c) $\delta\xi/\delta s - s$

Source: adapted from [8].

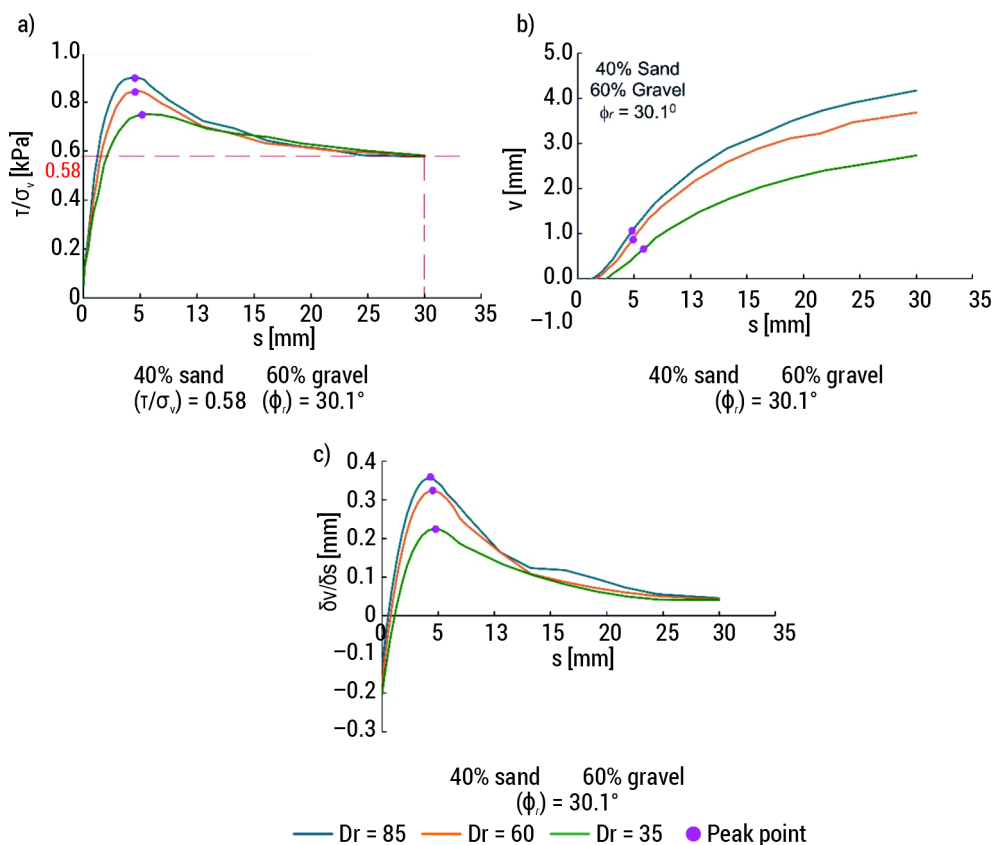


Figure 3. Direct shear test results in a large-scale box on sand mixed with 60% gravel at different relative densities under pressure of 450 kPa in planes: (a) $\tau/\sigma_v - s$; (b) $v - s$; (c) $\delta v/\delta s - s$
Source: adapted from [8].

Table 2. Strength and dilatancy at failure

Gravel content, %	Sand content, %	Dr, %	Experiment [8]			
			ϕ_{peak} , deg.	ϕ_r , deg.	$\delta v/\delta s$	Ψ , deg.
20	80	85	32.82	27.9	0.23	12.79
20	80	60	30.71	27.9	0.14	7.91
20	80	35	29.57	27.9	0.09	4.90
60	40	85	42.08	30.1	0.36	19.54
60	40	60	40.26	30.1	0.33	18.00
60	40	35	36.87	30.1	0.23	12.68

Source: own studies.

The peak points (ϕ_{peak}) of the sand-gravel mixture as well as its corresponding maximum dilation rate (ψ_{max}) and vertical displacement are shown in Figures 2 and 3 and in Table 2. The residual frictional angle is observed to increase from 27.9° for 20% gravel in the mixture to 30.1° for 60% gravel.

5. Results analysis

The experimental results of sand-gravel mixtures in a large-scale direct shear test show a significant deviation from the widely known stress-dilatancy theories. In the obtained analysis, the influence of relative density on sand strength was calculated using the equations of stress-dilatancy theories above, with some modifications.

Frictional State Concepts (FSC) in equation (9) was developed by Szypcio [3]. For the tested sand-gravel mixtures, the critical state angle (ϕ^0) = 27.9° and 30.1° for 20% and 60% gravel in the mixtures, respectively. The parameters α and β , which represent the mode of deformation and level of soil destruction in the shear band, are originally 0 and 1.4, respectively, for plane strain conditions in a small shear box. However, for larger-scale apparatus and coarser materials like sand-gravel mixtures, parameter α remains as zero, but β = 1.4 overestimates the dilatancy and was reduced to 0.5 and 0.8 for 20% and 60% gravel content, respectively. This was done to better reflect the experimental results by Hamidi et al. [8], as shown in Figure 4 and Table 3, acknowledging the increased non-homogeneity deformation in the shear bands and complex interlocking introduced by the gravel fraction in the large-scale shear box. It can be noticed that the parameter β depends on the gravel content and shear box size. Thus, an increase in gravel content leads to an increase in ϕ^0 , ϕ_{peak} and the value of β parameter.

Bolton's [17] empirical model used to describe the stress-dilatancy relationship in direct shear tests for sands (equation 8) has to be modified for sand-gravel mixtures with b originally set as 0.8 for plane strain conditions. However, this coefficient varies significantly with particle grading, especially in these mixtures in line with [7]. For this study, ϕ_{cv} = 27.9° and 30.1° for 20% and 60% gravel content, respectively. Bolton's [17] coefficient (b) is reduced to 0.4 and 0.55 for 20% and 60% gravel content, respectively, to reflect approximations of dilatancy observed in a large shear box of sand-gravel mixtures (Figure 5). Similar to FSC, the parameter b in equation (8) is dependent on the gravel content, with higher gravel content leading to an increase in b , ϕ_{cv} and ϕ_{peak} , as shown in Figures 5a and 5b and in Table 3.

Taylor [15] (equation 3) and Houlsby [18] (equation 7) model does not provide an accurate reflection of the experimental behaviour of the sand-gravel mixtures in the large-scale direct shear apparatus. In these theories, ϕ_r = 27.9° and 30.1° for 20% and 60% gravel content, respectively. Taylor's [15] model assumes a direct link between stress ratio and dilatancy (equation 3) but does not reflect the shear strength in these tests as seen in Figure 6. This limitation can be because of its assumption of homogenous deformation and constant energy distribution, which is not true for sand-gravel mixtures in a large shear box apparatus.

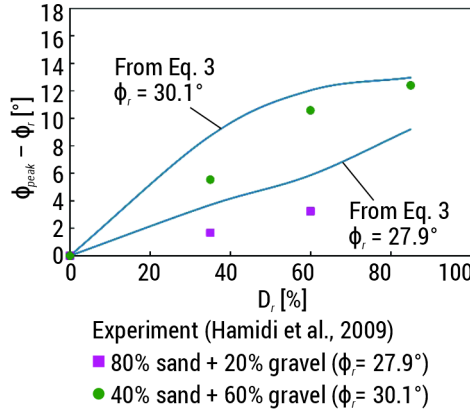


Figure 6. Taylor's relationship between $(\phi_{\text{peak}} - \phi_r)$ and D_r for sand-gravel mixtures with 20% and 60% gravel content

Source: own studies.

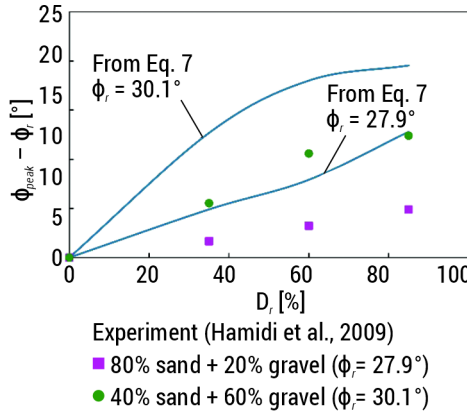


Figure 7. Houlsby's relationship between $(\phi_{\text{peak}} - \phi_r)$ and D_r for sand-gravel mixtures with 20% and 60% gravel content.

Source: own studies.

Similarly, Houlsby's [18] model shown in Figure 7 is not applicable to sand-gravel mixtures in a large shear box, as it overestimates the peak shear strength and dilatancy. The model does not adequately capture the effects of gravel interlocking and the resulting change in dilatancy at large gravel fractions. Thus, the size of the direct shear apparatus and the sand-gravel mixtures in the apparatus significantly influence the stress-dilatancy relationship in the mixture, as corroborated by Dołżyk-Szypcio [5], and Simoni and Houlsby [7].

Table 3. Strength and dilatancy at failure from different theories

Gravel content	Sand content	D_r	Experiment [8]	Theories					
				$\phi_{peak} - \phi_r$					
(%)	(%)	(%)	(deg)	Taylor [15]	Houlsby [18]	Bolton [17]		Szypcio [3]	
						b = 0.4	b = 0.55	$\beta = 0.5$	$\beta = 0.8$
20	80	85	4.90	9.20	12.79	5.12	–	4.84	–
20	80	60	3.24	5.86	7.91	3.17	–	3.07	–
20	80	35	1.67	3.70	4.90	1.96	–	1.92	–
20	80	0	0.00	0.00	0.00	0.00	–	0.00	–
60	40	85	12.40	12.96	19.54	–	10.75	–	11.13
60	40	60	10.58	12.03	18.00	–	9.90	–	10.36
60	40	35	5.54	8.72	12.68	–	6.97	–	7.55
60	40	0	0.00	0.00	0.00	–	0.00	–	0.00

Source: [8] and own studies.

For the mixtures tested in the experiment and across all theories, an increase in relative density (D_r) gives a corresponding increase in sand strength ($\phi_{peak} - \phi_r$) and dilatancy (ψ) as seen in Table 3. An increase in gravel content significantly changes the shear resistance of the sample. This is noticeable when an increase from 20% to 60% of gravel resulted in an increase in shear strength and dilatancy for all tested mixtures and across all theories.

6. Conclusions

This study underscores the importance of gravel content on the shear strength and dilatancy of sand-gravel mixtures in a large-scale direct shear apparatus. Understanding the optimum mixture of sand and gravel is important in construction of roads and embankments. An increase in gravel content led to an increase in shear strength (ϕ_{peak}) and dilatancy (ψ). Similarly, an increase in relative density also increased the shear strength and dilatancy.

The large direct shear apparatus can be used for testing coarse granular materials like sand-gravel mixtures. Contrary to the tests in small direct shear apparatus with pure sands, the stress-dilatancy relationship obtained from frictional state theory [3] and Bolton's [17] theory must be modified to accurately reflect the behaviour of these mixtures in this test apparatus. Bolton's dilatancy coefficient (b) was reduced from 0.8 to 0.4 and 0.55 for 20% and 60% gravel content, respectively, and the FSC parameter β [3] was adjusted from 1.4 to 0.5 and 0.8 for 20% and 60% gravel content, respectively. These two parameters (b and β) depend on the amount of gravel content

in the mixture, with an increase in gravel content leading to an increase in the value of the parameters.

Houlsby [18] and Taylor's [15] stress-dilatancy relationship does not fit well for tests in large direct shear apparatus and sand-gravel mixtures because of the non-homogeneity of deformation and interlocking behaviour of sand-gravel mixtures.

Acknowledgements

This work, carried out at the Faculty of Civil Engineering and Environmental Science of Białystok University of Technology and the Doctoral School of the Białystok University of Technology, was supported by the Polish Financial Resources on Science (Project No WI/WB-III/4/2025).

I would like to thank my Supervisor, Prof. Katarzyna Dołżyk-Szypcio, for her help in preparing this article and valuable substantive comments.

Literature

- [1] Szypcio, Z. (2019). The influence of particle breakage on stress-dilatancy relationship for granular soils. *E3S Web of Conferences*, 92, 09004. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20199209004>
- [2] Szypcio, Z. (2018). Stress-dilatancy of gravel for triaxial compression tests. *Annals of Warsaw University of Life Sciences – SGGW Land Reclamation*, 50(2), 119–128. <https://doi.org/10.2478/ssgw-2018-0010>
- [3] Szypcio, Z. (2017). Stress-dilatancy for soils. Part IV: Experimental validation for simple shear conditions. *Studia Geotechnica et Mechanica*, 39(1), 81–88. <https://doi.org/10.1515/sgem-2017-0008>
- [4] Szypcio, Z. (2017). Stress-dilatancy for soils. Part III: Experimental validation for the biaxial conditions. *Studia Geotechnica et Mechanica*, 39(1), 73–80. <https://doi.org/10.1515/sgem-2017-0007>
- [5] Dołżyk-Szypcio, K. (2019). Direct shear test for coarse granular soil. *International Journal of Civil Engineering*, 17, 1871–1878. <https://doi.org/10.1007/s40999-019-00417-2>
- [6] Bareither, C. A., Benson, C. H., Edil, T. B. (2008). Comparison of shear strength of sand backfills measured in small-scale and large-scale direct shear tests. *Canadian Geotechnical Journal*, 45(9), 1224–1236. <https://doi.org/10.1139/T08-058>
- [7] Simoni, A., Houlsby, G. T. (2006). The direct shear strength and dilatancy of sand gravel mixtures. *Geotechnical and Geological Engineering*, 24(3), 523–549. <https://doi.org/10.1007/s10706-004-5832-6>
- [8] Hamidi, A., Alizadeh, M., Soleimani, S. M. (2009). Effect of particle crushing on shear strength and dilation characteristics of sand-gravel mixtures. *International Journal of Civil Engineering*, 7(1), 61–71.
- [9] Stacho, J., Sulovska, M. (2022). Shear strength properties of coarse-grained soils determined using large-size direct shear test. *Civil and Environmental Engineering*, 18(1), 244–257. <https://doi.org/10.2478/cee-2022-0023>

- [10] Chang, W.-J., Phantachang, T. (2016). Effects of gravel content on shear resistance of gravelly soils. *Engineering Geology*, 207, 78–90. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2016.04.015>
- [11] Nakao, T., Fityus, S. (2008). Direct shear testing of a marginal material using a large shear box. *Geotechnical Testing Journal*, 31(5), 393–403. <https://doi.org/10.1520/GTJ101237>
- [12] Dissanayake, D. M. A. G. B., Kurukulasuriya, L. C., Dissanayake, P. B. R. (2016). Evolution of shear strength parameters of rail track ballast in Sri Lanka. *Journal of the National Science Foundation of Sri Lanka*, 44(1), 61–67. <https://doi.org/10.4038/jnsfsr.v44i1.7982>
- [13] Szypcio, Z., Dołżyk-Szypcio, K., Mierczyński, J. (2022). Dilatant nature of sand shear strength. *Applied Sciences*, 12(5), 2332. <https://doi.org/10.3390/app12052332>
- [14] Szypcio, Z., Dołżyk-Szypcio, K., Chmielewska, I. (2023). Stress–dilatancy behaviour of fibre-reinforced sand. *Materials*, 16(2), 609. <https://doi.org/10.3390/ma16020609>
- [15] Taylor, D. W. (1948). *Fundamentals of soil mechanics*. John Wiley and Sons Inc.
- [16] Rowe, P. W. (1962). The stress-dilatancy relation for static equilibrium of an assembly of particles in contact. *Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 269(1339), 500–527. <https://doi.org/10.1098/rspa.1962.0193>
- [17] Bolton, M. D. (1986). The strength and dilatancy of sands. *Géotechnique*, 36(1), 65–78. <https://doi.org/10.1680/geot.1986.36.1.65>
- [18] Houlsby, G. T. (1991). How the dilatancy of soils affects their behaviour. *Proceedings of the Tenth European Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, 4, 1189–1202.
- [19] Szypcio, Z. (2016). Stress–dilatancy for soils. Part I: The frictional state theory. *Studia Geotechnica et Mechanica*, 38(4), 51–58. <https://doi.org/10.1515/sgem-2016-0030>
- [20] Szypcio, Z. (2017). Stress–dilatancy for soils. Part II: Experimental validation for triaxial tests. *Studia Geotechnica et Mechanica*, 38(4), 59–65. <https://doi.org/10.1515/sgem-2016-0031>
- [21] Dołżyk-Szypcio, K. (2024). Natural state parameter for sand. *E3S Web of Conferences*, 544, 05005. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202454405005>
- [22] Dołżyk-Szypcio, K. (2019). Stress–dilatancy of rounded and angular rockfill materials. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 221, 012013. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/221/1/012013>
- [23] Wang, X., Wu, Y., Lu, Y., Cui, J., Wang, X., Zhu, C. (2021). Strength and dilatancy of coral sand in the South China Sea. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 80, 8279–8299. <https://doi.org/10.1007/s10064-021-02348-6>
- [24] Wang, X., Shan, I., Cui, J., Zhong, Y., Shen, J.-H., Wang, X.-Z., Zhu, C.-Q. (2022). Dilatancy of the foundation filling material of island-reefs in the South

- China Sea. *Construction and Building Materials*, 323, 126524. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.126524>
- [25] Kong, Y., Shen, F. (2018). Stress-dilatancy behaviour for fiber-reinforced. *Proceedings of the GeoShanghai 2018 International Conference: Fundamentals of Soil Behaviours* (GSIC 2018), 480–489. https://doi.org/10.1007/978-981-13-0125-4_53
- [26] Kong, Y., Zhou, A., Shen, F., Yao, Y.-P. (2019). Stress-dilatancy relationship for fiber-reinforced sand and its modeling. *Acta Geotechnica*, 14(1), 1871–1881. https://doi.org/10.1007/978-981-13-0125-4_53
- [27] Szypcio, Z., Dołżyk-Szypcio, K., Nurgaliyev, A. (2022). Stress-dilatancy relationship of sand-rubber mixtures. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 1260, 012003. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1260/1/012003>

The role of international initiatives in enhancing biodiversity protection in rail transport

Julia Milewicz, Tomasz Nowakowski, Grzegorz M. Szymański*

Institute of Transport

Faculty of Civil Engineering and Transport

Poznan University of Technology

**julia.milewicz@doctorate.put.poznan.pl*

Abstract: This chapter explores the role of international initiatives in enhancing biodiversity protection within rail transport, with a particular focus on how existing frameworks are applied in practice and the challenges faced in their implementation. It examines key global and European legal frameworks, sector-specific programmes, and projects that have shaped the integration of ecological considerations into railway planning. By analyzing the effectiveness of these initiatives, the work highlights both successes and ongoing challenges in aligning transport infrastructure with biodiversity conservation objectives. It further offers recommendations for improving interdisciplinary collaboration and developing more efficient strategies for mitigating biodiversity loss caused by rail development.

Key words: biodiversity protection, rail transport, sustainability, ecology

1. Introduction

The expansion of rail infrastructure has become a key element of sustainable mobility strategies worldwide. Although promoted as an environmentally friendly alternative to road or air transport, railways can significantly impact biodiversity by fragmenting habitats, disturbing wildlife movement, and disrupting ecological connectivity.

In response to growing concerns over biodiversity loss, international organizations and policymakers have developed legal frameworks, conventions, and strategies to integrate environmental protection into transport planning. For rail transport, the challenge extends beyond construction impacts, requiring the embedding of biodiversity considerations into long-term development through measures such as mitigation hierarchies, habitat connectivity, and ecosystem restoration.

This chapter examines how international frameworks and initiatives, particularly at the global and European levels, are shaping the integration of biodiversity considerations into transport planning. It also explores gaps and challenges in current approaches, offering insights into potential solutions that could improve ecological integration in railway development.

2. Global and European frameworks for biodiversity protection relevant to rail transport development

2.1. International conventions and agreements

International conventions and agreements have played a fundamental role in shaping the global response to biodiversity loss, providing a framework for the protection of ecosystems and species across national borders. In the context of rail transport development, several key conventions have established principles and obligations that guide the integration of biodiversity considerations into infrastructure planning.

The Ramsar Convention on Wetlands (1971) promotes the conservation and sustainable use of wetlands, recognizing their crucial role as habitats for numerous species, including migratory birds [1]. Rail infrastructure projects located near or within wetland areas are required to assess potential impacts carefully and to implement mitigation measures that preserve the ecological character of these sensitive environments.

The Bonn Convention (1979), formally known as the Convention on the Conservation of Migratory Species of Wild Animals, addresses the protection of migratory species throughout their range [2]. Since railway lines can intersect migratory routes and critical habitats, the agreement highlights the necessity for coordinated actions, such as the design of wildlife crossings and the maintenance of ecological corridors, to minimize disruptions.

The Bern Convention (1979) focuses on the conservation of European wildlife and natural habitats, emphasizing the need to prevent habitat fragmentation and to protect vulnerable species [3]. This treaty ensures that transport lines and construction practices do not harm critical habitats, which can result in the selection of alternative routes or the implementation of mitigation measures.

The Convention on Biological Diversity (1992) further reinforced global commitments to biodiversity conservation, promoting ecosystem-based approaches and mainstreaming biodiversity into sectoral policies, including transport. Its objectives encourage the application of the mitigation hierarchy and the adoption of practices that avoid, minimize, and compensate for ecological damage caused by infrastructure projects [4].

The Espoo Convention (1991) introduced the principle of transboundary environmental impact assessment, requiring states to notify and consult with neighbouring countries about major projects likely to have significant cross-border environmental effects [5]. This is particularly relevant for large railway developments that could impact ecosystems extending beyond national borders.

Finally, the European Landscape Convention (2000) has drawn attention to the importance of integrating landscape protection into planning processes. While not focused exclusively on biodiversity, it recognizes landscapes as essential

for supporting ecological functions and the quality of human environments, encouraging environmentally sensitive design of transport infrastructure [6].

Collectively, these international agreements establish a strong foundation for incorporating biodiversity protection into the planning and management of rail transport infrastructure, setting obligations that are often reflected and expanded within regional and national frameworks.

2.2. European Union regulations, policies and strategies

The European Union has established itself as a global leader in biodiversity protection, embedding environmental objectives into sectoral policies, including transport. Legally binding directives ensure that biodiversity is integrated into national legislation and railway planning.

The Habitats Directive (92/43/EEC) promotes the protection of natural habitats and species, establishing the Natura 2000 network to safeguard Europe's most valuable biodiversity [7]. Railway projects potentially affecting Natura 2000 sites must undergo rigorous assessments. Complementing it, the Birds Directive (2009/147/EC) focuses on wild bird species protection, requiring careful planning and mitigation in railway development [8].

The Strategic Environmental Assessment Directive (2001/42/EC) introduced the requirement for environmental assessments at the planning and programming stages [9]. SEA ensures that potential environmental impacts, including on biodiversity, are considered early in the development of plans and programs related to transport, enabling the avoidance of conflicts with conservation objectives before specific projects are designed.

At the project level, the Environmental Impact Assessment Directive (2011/92/EU, amended by 2014/52/EU) mandates detailed environmental evaluations for major infrastructure developments, including railway projects. The EIA process requires the identification, description, and evaluation of potential effects on biodiversity, as well as the design of measures to prevent, reduce, and where possible offset adverse impacts.

The hierarchical relationship between strategic planning and project assessments is illustrated in Figure 1, highlighting how SEA and EIA apply at different stages of transport infrastructure development.

In addition to these directives, the European Green Deal, launched in 2019, reinforces the EU's commitment to sustainable development and biodiversity conservation [10]. It sets ambitious targets for protecting ecosystems, restoring degraded habitats, and integrating nature-based solutions into infrastructure planning. Initiatives such as the EU Biodiversity Strategy for 2030 further underline the expectation that transport sectors, including rail, must contribute actively to halting biodiversity loss [11].

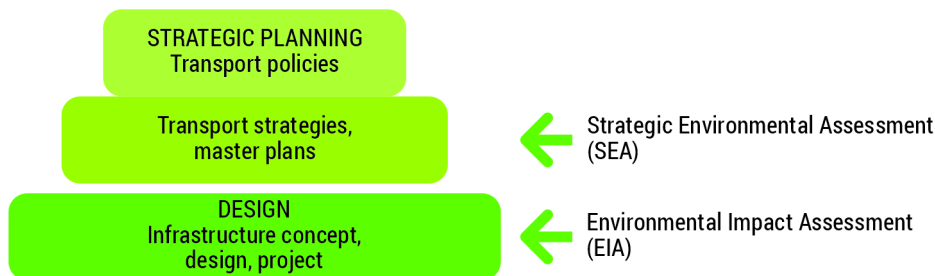


Figure 1. Hierarchical relationship between policy, plans and strategies/master plans included in the Strategic Planning phase, concept design and project (detailed design) included in Design phase, and impact assessment for transport infrastructure

Source: [12].

Together, these frameworks ensure that railway development aligns with high environmental standards, supporting biodiversity preservation alongside sustainable mobility goals.

3. Sector-specific initiatives, programmes and projects

3.1. General initiatives on transport infrastructure and biodiversity

Efforts to address the ecological impacts of transport infrastructure have a long tradition in Europe, originating from collaborations between scientists, engineers, and policymakers. One of the pioneering initiatives was COST Action 341 (“Habitat Fragmentation due to Transportation Infrastructure”), launched under the European Cooperation in Science and Technology framework (1998–2003). It emphasized integrating ecological connectivity into all stages of transport planning and led to the publication of the landmark European guidelines *Wildlife and Traffic: A European Handbook for Identifying Conflicts and Designing Solutions* [13].

A more recent initiative, the BISON project (“Biodiversity and Infrastructure Synergies and Opportunities for European Transport Networks”), carried out in 2021–2023 by the Infrastructure and Ecology Network Europe (IENE) [14], further advanced this field. BISON assessed the impacts of transport infrastructure on biodiversity and produced strategic recommendations for future planning. It developed a Strategic Research and Deployment Agenda and the handbook *“Biodiversity and Infrastructure: A Handbook for Action”* [15] encouraging collaboration between the transport and ecology sectors.

Additionally, the LIFE Programme [16], funded by the European Commission, although not transport-specific, has supported many projects aimed at reducing wildlife mortality and improving ecological connectivity near transport corridors.

Collectively, these initiatives highlight the growing recognition of the need to harmonize infrastructure development with biodiversity conservation, providing valuable frameworks, tools, and strategic guidance.

3.2. Rail-specific initiatives and programmes

Within the railway sector, specific organizations and projects have emerged to address the unique environmental challenges associated with rail infrastructure.

The International Union of Railways (UIC) has taken a leadership role through its Environment and Sustainability Platform, coordinating research and promoting best practices among its member organizations. A notable example is the rEvERsE project (“Ecological Effects of Railways on Wildlife”), which focuses on understanding the impacts of railway operations on biodiversity and developing mitigation measures [17]. The rEvERsE project emphasizes actions such as constructing wildlife crossings, implementing fencing systems, and monitoring ecological impacts along rail corridors.

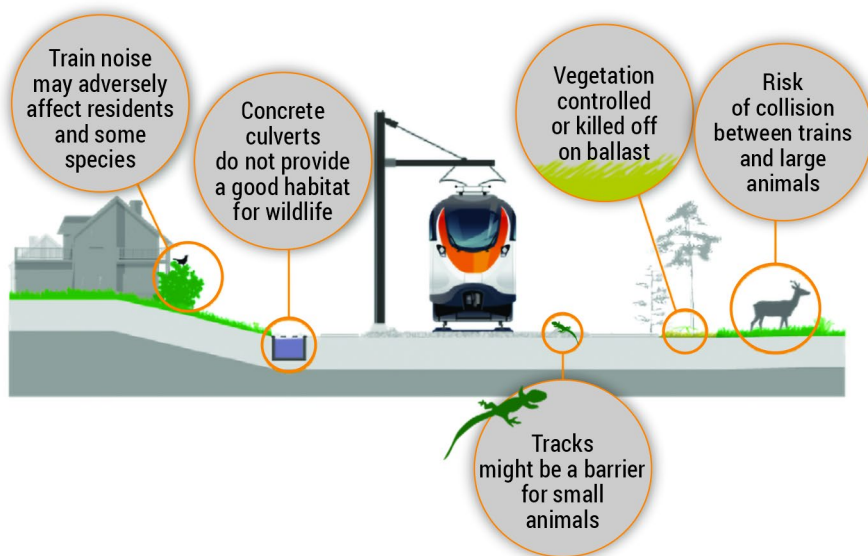


Figure 2. Possible negative impacts on biodiversity due to maintenance works and operation of a railway line indicated in rEvERsE project.

Source: [18].

In parallel, the Connecting Europe Facility (CEF) programme provides significant financial support for sustainable railway development [19]. CEF directly funds major rail infrastructure projects across Europe, with a strong emphasis on environ-

mental responsibility. Compliance with environmental assessments, habitat preservation, and the minimization of ecological fragmentation are mandatory elements for projects seeking CEF support. The programme thus not only advances transport connectivity but also integrates biodiversity conservation requirements into infrastructure planning and implementation. An example of a solution to prevent collisions between trains and animals and to maintain the connectivity of migration corridors is shown in Figure 3.

The Interreg programme has supported cross-border projects aimed at promoting ecological connectivity in areas where railway networks intersect important natural habitats, fostering cooperation between neighbouring countries [20]. Funding has enabled initiatives such as constructing ecological corridors, protecting Natura 2000 sites, and developing green infrastructure along rail routes. Interreg also facilitates research on the environmental impact of railways and promotes the exchange of knowledge, encouraging the implementation of innovative solutions like green embankments and emission-reducing technologies.



Figure 3. Animal crossing under the railway line E-75 Rail Baltica “Warsaw–Białystok–Lithuania” border as a habitat connectivity measure implemented during the upgrade co-financed by the CEF

Source: [21].

Together, these rail-specific initiatives and programmes demonstrate a growing commitment to aligning railway development with biodiversity conservation objectives, advancing the practical application of international and European environmental policies within the transport sector.

4. Discussion: benefits, challenges and transferability

The integration of biodiversity protection into rail transport has led to the development of numerous initiatives, programmes, and practical applications. Alongside safety, accessibility, and energy efficiency, biodiversity conservation has become a key element of sustainable rail strategies. Frameworks such as the Habitats Directive, the rEvERsE project, and funding instruments like the Connecting Europe Facility have promoted the systematic inclusion of ecological considerations in railway planning and execution.

A major advantage of these initiatives is the promotion of interdisciplinary collaboration, resulting in more balanced infrastructure solutions. The adoption of measures such as wildlife crossings and habitat restoration demonstrates that biodiversity integration is feasible even in large-scale transport projects. Resources developed under initiatives like BISON have further supported effective planning and monitoring.

However, several limitations remain. Biodiversity measures often face financial, procedural, and political barriers, and environmental assessments are sometimes treated as formalities. In many developing countries, biodiversity protection is secondary to economic growth, and ecological concerns are stereotypically reduced to noise and air pollution control. Translating ambitious environmental objectives into daily practice remains challenging, requiring sustained political will and public engagement.

Despite these obstacles, many principles, such as ecological connectivity and adaptive management, are transferable across regions. Successful biodiversity integration in rail projects offers models for broader infrastructure planning. Strengthening knowledge exchange, harmonizing methodologies, and reinforcing international cooperation will be crucial to further improving the effectiveness of biodiversity-friendly transport development.

The analysis presented in this chapter highlights the evolving role of international initiatives in promoting biodiversity protection within rail transport. By synthesizing existing legal frameworks and sector-specific efforts, it offers a critical perspective on their practical application and effectiveness. The discussion also touches on key challenges in aligning infrastructure development with biodiversity goals, suggesting areas where further interdisciplinary collaboration could enhance the integration of ecological considerations into transport planning. Moreover, it identifies practical approaches to overcoming barriers that may hinder the successful implementation of biodiversity-friendly measures in railway projects.

5. Summary

Biodiversity protection has become an essential component of sustainable rail transport, supported by international conventions, EU directives, and sector-specific initiatives. Legal frameworks, programmes, international projects and initiatives have helped to integrate ecological considerations into railway planning and development.

Although significant progress has been made, challenges related to funding, prioritization, and practical implementation persist. Successful projects demonstrate, however, that biodiversity objectives can be effectively incorporated into infrastructure development when supported by interdisciplinary collaboration and strategic planning. By evaluating existing efforts and identifying key gaps, this chapter offers insights into improving future approaches for more effective integration of biodiversity considerations in railway development.

Continued efforts are needed to strengthen environmental assessments, promote ecological connectivity, and ensure that future railway projects contribute meaningfully to biodiversity conservation and broader sustainability goals.

Acknowledgements

The presented work has been co-financed from the subsidies appropriated by the Ministry of Education and Science–0416/SBAD/0006.

Literature

- [1] Matthews, G. V. T. (2013). *The Ramsar Convention on Wetlands: Its history and development*. Re-issued Ramsar Convention Secretariat. Ramsar Convention Bureau.
- [2] Trouwborst, A. (2011). Conserving European biodiversity in a changing climate: The Bern Convention, the European Union Birds and Habitats Directives and the adaptation of nature to climate change. *Review of European Community and International Environmental Law*, 20(1), 62–77.
- [3] Genovesi, P., Shine, C. (2004). *European strategy on invasive alien species: Convention on the Conservation of European Wildlife and Habitats (Bern Convention)*. Council of Europe.
- [4] Ament, R., Clevenger, A., van der Ree, R. (2023). *Addressing ecological connectivity in the development of roads, railways and canals*. IUCN WCPA Technical Report Series. <https://doi.org/10.53847/IUCN.CH.2023.PATRS.5.en>
- [5] Bastmeijer, C. J., Koivurova, T. (2007). *Legal aspects of sustainable development* (Vol. 1). *Theory and practice of transboundary environmental impact assessment*. Brill. <https://doi.org/10.1163/ej.9789004164796.i-400>
- [6] Löfgren, S., Nilsson, K. L., Johansson, C. M. (2018). Considering landscape in strategic transport planning. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 65, 396–408. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2018.09.001>

- [7] Evans, D. (2012). Building the European Union's Natura 2000 Network. *Nature Conservation*, 1, 11–26. <https://doi.org/10.3897/natureconservation.1.1808>
- [8] Ramirez, I., Tarzia, M., Dias, M. P., Burfield, I. J., Ramos J. A., Garthe, S., Paiva, V. H. (2017). How well is the EU protecting its seabirds? Progress in implementing the Birds Directive at Sea. *Marine Policy*, 81, 179–184.
- [9] Liubchenko, A. (2024). General principles of target designation of agricultural lands. *Three Seas Economic Journal*, 5, 86–90. <https://doi.org/10.30525/2661-5150/2024-5-13>
- [10] European Council. (n.d.). *European green deal*. Retrieved April 26, 2025, from: <https://www.consilium.europa.eu/pl/policies/green-deal>
- [11] European Commission. (2020). *EU biodiversity strategy for 2030. Bringing nature back into our lives*. <https://sdgs.un.org/partnerships/eu-biodiversity-strategy-2030-bringing-nature-back-our-lives>
- [12] OECD. (2018). *Mainstreaming biodiversity for sustainable development*. OECD Publishing. <https://doi.org/10.1787/9789264303201-en>
- [13] Iuell, B., Bekker, H. G. J., Cuperus, R., Dufek, J., Fry, G., Hicks, C., Hlaváč, V., Keller, V., Rosell, C., Sangwine, T., Tørsløv, N., Wandall, B. le M. (2003). *Wild-life and traffic: A European handbook for identifying conflicts and designing solutions*. KNNV Publishing.
- [14] IENE. (2021). *BISON project – Biodiversity and infrastructure synergies and opportunities for European transport networks*. <https://www.iene.info/projects/bison>
- [15] IENE. (n.d.). *Biodiversity & Infrastructure. A handbook for action*. Retrieved January 24, 2025, from: <https://www.biodiversityinfrastructure.org>
- [16] European Commission. (n.d.). LIFE Programme. Retrieved June 18, 2025, from: https://cinea.ec.europa.eu/programmes/life_en
- [17] International Union of Railways (UIC) Sustainability. (2022). *European railways: Strategy and actions for biodiversity, rEvERsE final report*. https://uic.org/IMG/pdf/uic_reverse_strategy_and_actions_for_biodiversity.pdf
- [18] International Union of Railways (UIC) Sustainability. (2023). *UIC guidelines on managing railway assets for biodiversity*. https://uic.org/IMG/pdf/uic_reverse_guidelines_on_managing_railway_assets_for_biodiversity.pdf
- [19] CUPT. (n.d.). Centrum Unijnych Projektów Transportowych, Instrument: Łącząc Europę – Fundusze Europejskie). Retrieved April 26, 2025, from: <https://www.cupt.gov.pl/fundusze-europejskie/instrument-laczac-europe-cef>
- [20] Interreg. (n.d.). About. Retrieved June 18, 2024, from: <https://interreg.eu/about-interreg>
- [21] PKP Polish Railway Lines S.A. (2020). *Zwierzęta bezpiecznie wędrują obok pociągów na Rail Baltica*. <https://www.plk-sa.pl/o-spolce/biuro-prasowe/informacje-prasowe/szczegoly/zwierzeta-bezpiecznie-wedruja-obok-pociagow-na-rail-baltica-4910>

The impact of tire profile height and pressure on driver seat vibrations and the degree of tire grip on the road surface

Adam Kamiński

Department of Vehicle Engineering

Faculty of Mechanical Engineering

Wrocław University of Science and Technology

adam.kaminski@pwr.edu.pl

Abstract: The study presents the impact of the sidewall height of the tire and its inflation level on the vibration damping characteristics, the tire's grip on the surface, and the perceived vibrations on the driver's seat. A 2006 Ford Explorer with a 4.6L V8 3V engine was selected for the study. Two Yokohama Geolandar tires were tested: one sized 235/70R16 and the other 265/75R16. Both tires were tested across a pressure range from 1 to 3 bars, with a step of 0.2 bars. Measurements were conducted using PICO Scope instrumentation, Ford VCMM, and a VTEQ suspension tester.

Key words: tire, automotive, pressure, grip, NVH

1. Introduction

The issue of research on automotive tires is widely analyzed in the scientific literature due to the crucial importance of this vehicle component for safety, driving comfort, and energy efficiency. Xiong and Tuononen (2014) proposed the use of a laser measurement system for analyzing tire tread deformation, enabling precise identification of phenomena related to rolling resistance [1]. In contrast, Gao et al. (2021) developed a Flexible Ring Tire Model (FRTM) that considers the actual distribution of contact pressure, allowing for more accurate prediction of tire deformations at high speeds [2]. Zhao et al. (2020) focused on the application of Fiber Bragg Grating (FBG) sensors for continuous measurement of tire deformations, demonstrating the high precision of this method [3]. Furthermore, Xiong and Tuononen (2015) presented detailed studies on truck tire deformations, focusing on the impact of rolling resistance on fuel consumption [4].

Prażnowski et al. (2016) demonstrated that the use of the PONTOS optical measurement system allows for precise analysis of dynamic tire deformations in a 3D setup [5]. The research by Chang et al. (2021) addressed the estimation of tire wear and mileage based on measurement data [6]. Mamedes et al. (2014) investigated the effect of tire size on the accumulation of fatigue damage in vehicle structures [7].

An equally important research area is the influence of tire geometry, including sidewall height and pressure, on vibration damping characteristics and grip on the surface.

The aim of this study is to analyze the impact of tire profile height and pressure on the vibrations transmitted to the driver's seat and the tire's grip on the surface. The study used a 2006 Ford Explorer, and measurements were carried out using advanced measurement equipment, including a Pico TA143 MEMS accelerometer and a VTEQ suspension tester. The study aims to provide practical knowledge that can contribute to improving vehicle safety and comfort.

2. Materials and methods

The test vehicle used in the experiment was a 2006 Ford Explorer in the XLT version, equipped with a 4.6L V8 3V engine. The tests were conducted on the front axle of the vehicle. To measure the level of vibration, an accelerometer was attached using a magnet to the bolt securing the driver's seat frame to the vehicle body. Vibration measurements were performed in three directions: X, Y, and Z. Due to the nature of the measurement, the values were later summed programmatically using vector summation.

To facilitate the observation of differences, in addition to the raw time and frequency waveforms, the RMS, maximum, and minimum values of the waveforms were determined, followed by the calculation of differences between the minimum and maximum values.

Data were read using a four-channel PICO Scope 4425A oscilloscope along with an external three-axis accelerometer interface (PP877). The range of measurable frequencies, as declared by the manufacturer, is up to 350 Hz, with a maximum measurable acceleration of ± 5 g. With an oscilloscope featuring a 20 MHz bandwidth and 12-bit vertical resolution, this setup enables highly precise measurements with high sampling rates. The accelerometer sampling rate was set at 20,000 Hz, while the time was recorded programmatically in duplicate. This required basing the analyses on time averaging between cells. Despite this, there were 20,000 measurement points per second. An example of data recorded from the accelerometer is presented in Table 1. Additionally for the road test Ford VCMM hardware and software was used.

Table 1. Sample results from accelerometers

Time	ChA [g] (X)	ChB [g] (Y)	ChC [g] (Z)
0.001	0.00645	0.00954	-0.02087
0.001	-0.00179	0.0101	-0.02656
0.0011	2.08582E-4	0.01123	-0.02884
0.0011	-0.00349	0.01348	-0.02884

Time	ChA [g] (X)	ChB [g] (Y)	ChC [g] (Z)
0.0012	0.00134	0.01462	-0.01974
0.0012	-0.00121	0.01518	-0.02087
0.0013	0.00304	0.01462	-0.02031
0.0013	0.00758	0.01235	-0.01917
0.0014	-6.40644E-4	0.0101	-0.01917
0.0014	-0.00292	0.0101	-0.01462

Source: own studies.

The hardware used for the study is presented in tabular form in Table 2.

Table 2. Hardware list

No.	Name	Mark	Type
1.	Accelerometer	Pico	TA143 MEMS
2.	3 Axis interface	Pico	PP877
3.	4 Channel Oscilloscope with FFT	Pico	4425A
4.	Ford VCMM	Bosch	VCMM
5.	Test Bench	VTEQ	Suspension Tester

Source: own studies.

The software used for data collection was PICO NVH. After data collection, the data were exported to CSV and then imported into Origin Lab software, where further signal processing was performed.

Figure 1, on the other hand, shows the signal waveforms during the test in the time domain. The results are initially subjected to deep filtering. Information about the type of filtering is not provided by the manufacturer, which means they only serve as a comparative and indicative value. In Figure 2, the time course of the test is shown for the left and right wheels of the front axle of the vehicle, divided into each of the X, Y, Z axes. Vibrations in the X-axis, described by channel A, were dominant in the test.

The induction of vibrations and the test of tire grip on the surface were conducted using a VTEQ machine, which is a certified device used at vehicle inspection stations to verify the effectiveness of vibration damping. The device allows for vibration induction in the range of 0 to 25 Hz, with a sampling rate of 256 times per second.

The suspension test consists of two vibration induction cycles, first on the left wheel and then on the right wheel. Each time, vibrations are activated for approximately 5 seconds per side. Due to the aspect of damping time and the programmed pause between the left and right wheel tests, a time range of 21.5 seconds was adopted for result verification. This allowed for the elimination of errors related to the start and end times and included the test cycle for both the right and left wheels.

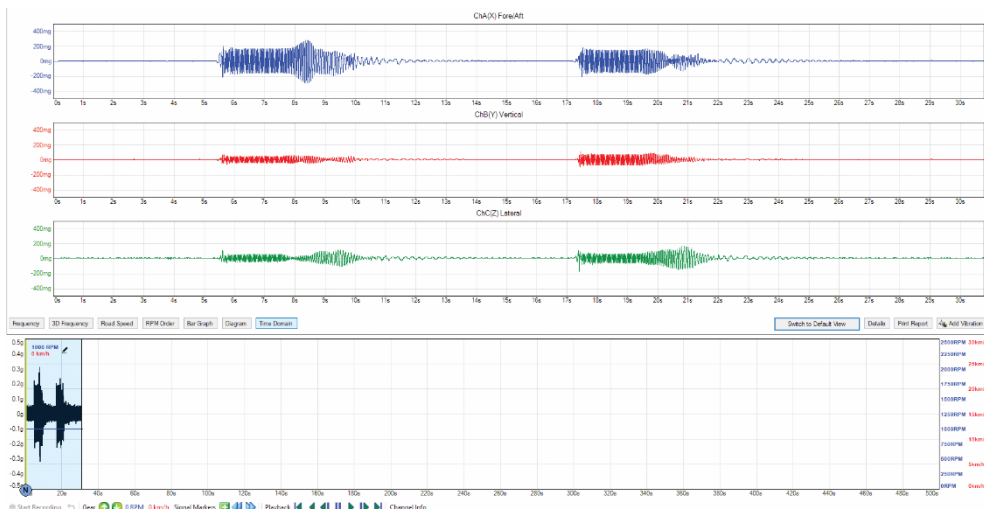


Figure 1. Sample results from PICO NVH software. 235/70R16 1.6 bar. time domain
Source: own studies.

As with the accelerometer measurements, data from the VTEQ device were exported to CSV and then prepared for import into Origin Lab for further processing. The device software automatically generated two types of charts. The first showed the wheel's grip on the surface in the time domain, and the second showed the grip level over time. Due to comparative limitations, these charts were not used in the final analysis.

Figure 2 shows the program window for controlling the vibration damping efficiency of the suspension presented in the frequency domain. In addition to the grip values, the software records the ground pressure for the right and left wheels.

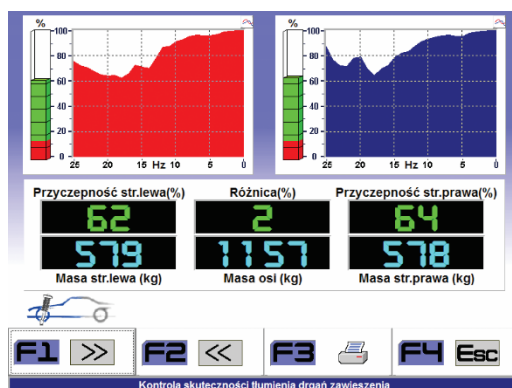


Figure 2. Sample results from VTEQ device. 235/70R16 2.4 bar. Suspension test in frequency domain
Source: own studies.

The time-domain graph generated by the software is shown in Figure 3. It allows for the verification of signal amplitude at any moment during the test duration.

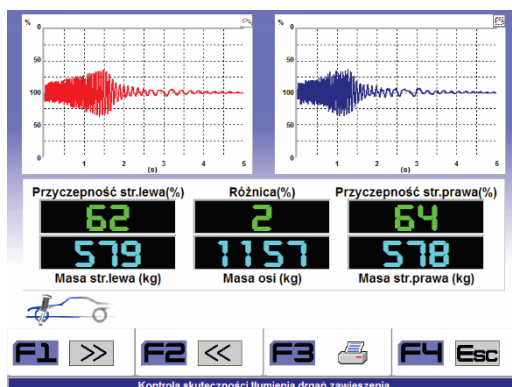


Figure 3. Sample results from VTEQ device. 235/70R16 2.4 bar. Suspension test in time domain
Source: own studies.

The diagnostic device uses EUSAMA method for measurement. This means that a perfectly rigid suspension, calibrated for maximum possible grip on the surface, would achieve 100% in the test. The grip data is calculated based on the oscillation of the mass recorded on the device's plates. An example of data recorded by the device is shown in Table 3.

Table 3. Sample results of VTEQ device extracted data. Suspension test in time domain

Time [s]	Right Side Weight During the Test [kg]
0	573
0.00391	557
0.00781	560
0.01172	560
0.01563	642
0.01953	642
0.02344	639
0.02734	636
0.03125	568
0.03516	562

Source: own studies.

In order to represent and process the data, as shown in Figure 3, the data were normalized. The vehicle's mass before the test was taken as the reference point. An example of the normalized data is provided in Table 4.

Table 4. Sample results of VTEQ device extracted data. Suspension test in time domain + normalized data

Time [s]	Right Side Weight During the Test [kg]	Normalized
0	573	100
0.00391	557	97.20768
0.00781	560	97.73124
0.01172	560	97.73124
0.01563	642	112.04188
0.01953	642	112.04188
0.02344	639	111.51832
0.02734	636	110.99476
0.03125	568	99.1274
0.03516	562	98.08028

Source: own studies.

Thanks to this approach, an identical representation was achieved, just as the diagnostic software performs it. The vehicle featured a 4x4 drivetrain, based on a Dana 35 front axle and a Ford 8.8 rear axle. The front suspension, which was tested, is of the SLA (Short Long Arm) type, with upper and lower control arms and a shock absorber mounted in the spring. The recommended tire pressure for the vehicle is 2.4 bar.

The tires used for the test were Yokohama Geolandar A/T G015 235/70R16 106R and Yokohama Geolandar HT G56 265/75R16 116H. The differences are presented in tabular form in Table 5.

Table 5. Tires

	Tire 1	Tire 2	Difference [%]
Mark	Yokohama	Yokohama	
Made In	Japan	Japan	
Type	A/T	HT	
Model	G015	G56	
Tire Size	235/70R16	265/75R16	
Rating	106R	116H	
Tire Height (Diameter)	777 mm	804 mm	9,31
Wheel Size	406 mm	406 mm	0

	Tire 1	Tire 2	Difference [%]
Sidewall Height	165 mm	199 mm	20,82
Tire Width	135 mm	265 mm	12,77
Tire Circumference	2310 mm	2526 mm	9,31
Revolutions per Mile	696,6	637,2	8,52
Revolutions per Kilometer	432,8	396	8,52

Source: own studies.

The optical differences, along with the speed calculations for each tire, are shown in Figure 4. The greatest difference between the tires occurs in the sidewall height, which is as much as 20.82%. According to the manufacturer, the internal structure and reinforcement profile are very similar. The tires mainly differ in the tread pattern. The tread height for the model is defined by the tire's base size. As the size increases, the tread height also increases.

Speedometer Difference:

Tire 1 (mph or km/h):	20	40	60	80	100	120
Tire 2 (mph or km/h):	21.7	43.4	65.1	86.8	108.5	130.2



Figure 4. Tire differences

Source: Calculatar.net – tire size calculator.

The test for each tire was conducted at pressures ranging from 1 to 3 bar. The external temperature was kept constant. After each pressure change, a short waiting period was observed to allow the temperature inside the tire and, consequently, the pressure, to stabilize.

3. Results

The basic parameters of the suspension damping test, recorded by the test machine, are presented in Table 6. From the analysis, it can be observed that the grip percentage increases as the tire pressure decreases.

Table 6. Base measurements data

Pressure / Tire	Right Side Grip, %	Left Side Grip, %	Delta Grip, Pp	Right Side Weight, kg	Left Side Weight, kg	Summary Weight, kg
1_Bar_235_70_R16_AT	91	87	4	562	576	1138
1,2_Bar_235_70_R16_AT	86	85	1	570	576	1146
1,4_Bar_235_70_R16_AT	83	83	0	573	571	1144
1,6_Bar_235_70_R16_AT	81	79	2	570	574	1144
1,8_Bar_235_70_R16_AT	76	76	0	570	574	1144
2,0_Bar_235_70_R16_AT	71	74	3	573	574	1147
2,2_Bar_235_70_R16_AT	71	73	2	573	574	1147
2,4_Bar_235_70_R16_AT	70	70	0	573	574	1147
2,6_Bar_235_70_R16_AT	68	64	4	573	576	1149
2,8_Bar_235_70_R16_AT	66	63	3	573	576	1149
3,0_Bar_235_70_R16_AT	61	57	4	576	576	1152
1_Bar_265_75_R16_HT	88	87	1	581	579	1160
1,2_Bar_265_75_R16_HT	82	84	2	583	576	1159
1,4_Bar_265_75_R16_HT	78	81	3	578	576	1154
1,6_Bar_265_75_R16_HT	78	77	1	578	576	1154
1,8_Bar_265_75_R16_HT	72	74	2	581	576	1157
2,0_Bar_265_75_R16_HT	71	71	0	578	579	1157
2,2_Bar_265_75_R16_HT	66	66	0	578	579	1157
2,4_Bar_265_75_R16_HT	65	64	1	578	582	1160
2,6_Bar_265_75_R16_HT	64	62	2	578	579	1157
2,8_Bar_265_75_R16_HT	61	59	2	578	582	1160
3,0_Bar_265_75_R16_HT	58	56	2	578	582	1160

Source: own studies.

The differences in the recorded weight result from the accuracy of the machine's scale as well as the varying degree of tire contact with the surface depending on the tire pressure. As the tire pressure increased, the contact point between the tire and the surface decreased. The analysis of the results in terms of average values from the left and right side of the machine readings, along with the addition of processed average results, is presented in Table 7. Due to changes in the values at the fourth decimal place, which distinguish the results, rounding to this decimal place was applied. The letter "N" in the table denotes normalized values.

Table 7. Grip and accelerometers outcome values

Pressure/Tire	Grip SAE (L+R), %	Mean Grip vs. Frequency (L+R), %	Delta N. Weight During the Test (L+R), pp.	Vector SUM Delta Accelerometers, g	Vector Mean SUM Accelerometers, g	Vector RMS SUM Accelerometers, g
1_Bar_235_70_R16_AT	89	95,35	N/A	0,2731	0,0557	0,0735
1,2_Bar_235_70_R16_AT	85,5	93,23	27,37	0,2569	0,0565	0,0747
1,4_Bar_235_70_R16_AT	83	92,50	31,94	0,2873	0,0579	0,0782
1,6_Bar_235_70_R16_AT	80	91,38	38,95	0,3255	0,0599	0,0817
1,8_Bar_235_70_R16_AT	76	88,46	48,25	0,3622	0,0610	0,0843
2,0_Bar_235_70_R16_AT	72,5	87,12	55,32	0,3730	0,0617	0,0863
2,2_Bar_235_70_R16_AT	72	86,77	56,20	0,3879	0,0625	0,0878
2,4_Bar_235_70_R16_AT	70	86,23	59,51	0,3903	0,0641	0,0903
2,6_Bar_235_70_R16_AT	66	86,46	65,79	0,4138	0,0657	0,0932
2,8_Bar_235_70_R16_AT	64,5	85,62	71,03	0,4139	0,0668	0,0955
3,0_Bar_235_70_R16_AT	59	82,08	76,56	0,4324	0,0686	0,0991
1_Bar_265_75_R16_HT	87,5	94,35	26,33	0,2228	0,0605	0,0810
1,2_Bar_265_75_R16_HT	83	91,08	34,48	0,2600	0,0589	0,0775
1,4_Bar_265_75_R16_HT	79,5	89,15	42,04	0,2786	0,0560	0,0739
1,6_Bar_265_75_R16_HT	77,5	89,38	46,71	0,3034	0,0555	0,0744
1,8_Bar_265_75_R16_HT	73	86,31	53,18	0,3185	0,0559	0,0760
2,0_Bar_265_75_R16_HT	71	86,88	58,48	0,3431	0,0561	0,0768
2,2_Bar_265_75_R16_HT	66	86,19	66,78	0,3661	0,0569	0,0791
2,4_Bar_265_75_R16_HT	64,5	84,00	72,32	0,3761	0,0582	0,0812
2,6_Bar_265_75_R16_HT	63	85,65	72,32	0,3798	0,0588	0,0822
2,8_Bar_265_75_R16_HT	60	82,65	78,72	0,4036	0,0599	0,0843
3,0_Bar_265_75_R16_HT	57	83,46	83,74	0,4095	0,0603	0,0851

Source: own studies.

The first column of values defines the grip of the left and right wheels, as provided by the machine, according to the SAE standard. This result is interpreted during periodic inspections. It represents the lowest grip value recorded during the test. The second column shows the average grip relative to frequency for the entire test. The third column defines the difference, in percentage points, between the lowest and highest grip values recorded during the test, in the time domain.

“Vector Mean SUM Accelerometers” describes the average acceleration value recorded by the accelerometer mounted on the bolt securing the driver’s seat frame, after performing vector summation for the X, Y, Z axes. The test time used for averaging is 21.5 seconds. Details of this methodology were described in the previous chapter. The last column shows the RMS value from the vector sum of the accelerometer.

Figure 5 graphically shows how the wheel’s grip on the surface changed depending on the tire pressure and type. The results are presented on a single graph, showing both the SAE standard and the average values from the frequency domain.

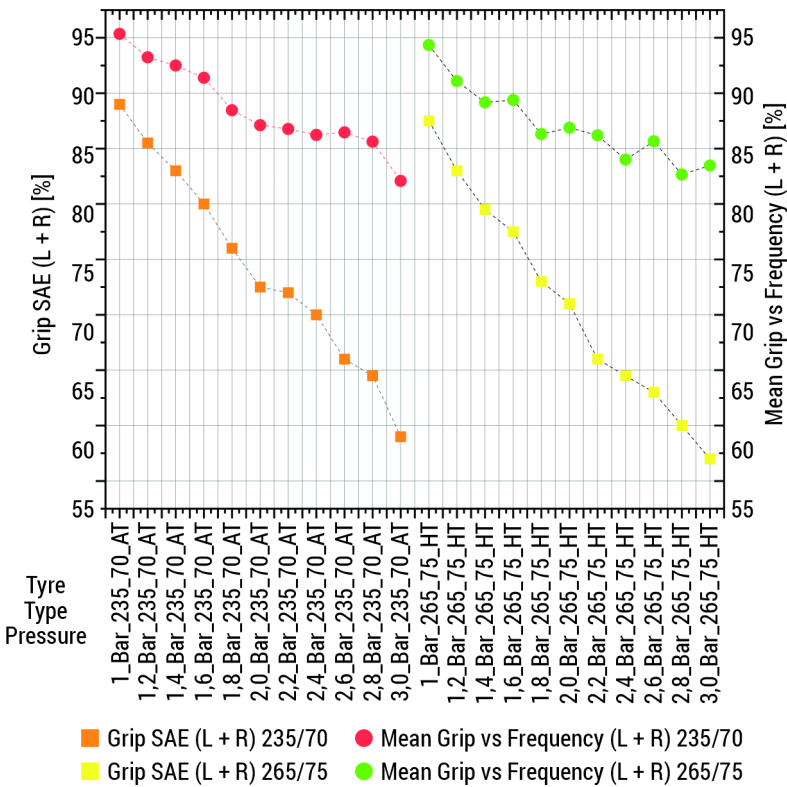


Figure 5. Grip SAE and mean grip

Source: own studies.

As the pressure increased, a decrease in the wheel’s grip on the surface was observed. This decrease was seen both for the average value and the SAE value. The tire with a higher profile provided a lower level of grip to the surface at each tested pressure. When comparing values for 2.4 bar, the 235/70 tire achieved results of 70% and 86.32% for SAE and Mean Grip, respectively, while the 265/75 tire achieved values of 64.5% and 84%. This means that, despite the higher profile, the tire provides

a lower level of contact with the surface during suspension response, which can also be felt while driving.

Figure 6 illustrates the delta value between the maximum and minimum values of the normalized wheel pressure on the surface during the test. The values were recorded by the test machine. The value for the 235/70 tire at a pressure of 1 bar was lost, and therefore, it is not included in the table or the graph.

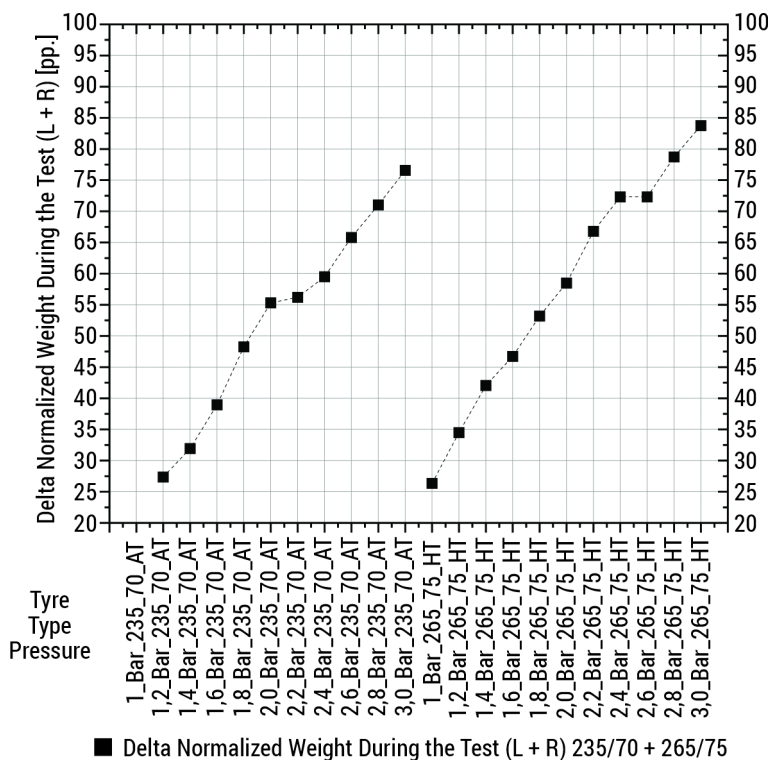


Figure 6. Delta normalized weight

Source: own studies.

It was observed that as the pressure increased, almost linearly, the difference between the maximum and minimum recorded pressure values also increased. This indicates that the amplitude values during the test were higher, suggesting an increase in suspension stiffness due to the reduced deflection of the tire. As the pressure increased, the delta differences between the tires also grew. For a pressure of 2.4 bar, the delta for the 235/70 tire was 59.51 percentage points, while for the 265/75 tire, it increased to 72.32 percentage points. The disturbances in the linearity of the measurements may be related to inaccuracies in pressure measurement, changes in the tire's interaction with the surface, and possible temperature differences within the tire during the test.

For the accelerometer measurements, the graphical representation of the average values and RMS is shown in Figure 7. In the case of the 235/70 tire, a linear relationship is observed for both the average values and RMS. The values increase as the pressure rises, indicating that the vibrations felt by the driver increase with higher tire pressure.

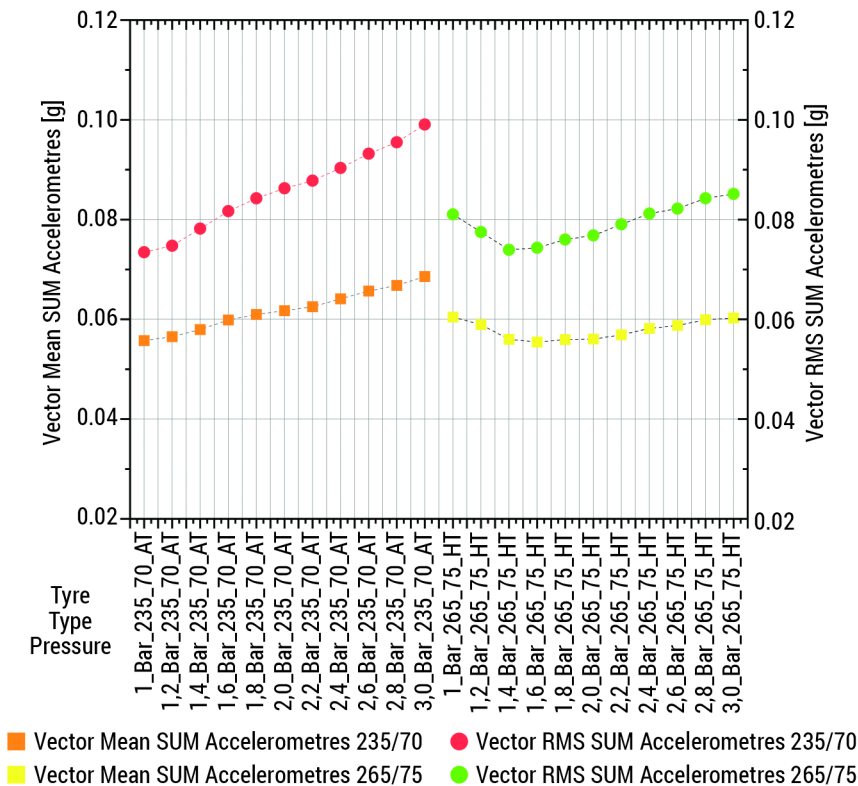


Figure 7. Vector sum mean and RMS value

Source: own studies.

For the 265/75 tires, no linear relationship was observed. In the range from 1 to 1.6 bar, the acceleration values decrease, then start to rise again, but the increase is much smoother compared to the 235/70 profile. At a pressure of 2.4 bar, the 235/70 tire reached average and RMS values of 0.0641 g and 0.0903 g, respectively. For the 265/75 tires, these values reached 0.0582 g and 0.0812 g. At higher pressures, the vibrations felt by the driver are significantly lower with the higher-profile tire. At pressures close to 1 bar, lower accelerations were recorded for the 235/70 tire.

A comparison of the delta for the vector sum of accelerations is shown in Figure 8. The delta indicates the largest peak ranges or shock impacts that occurred during the test.

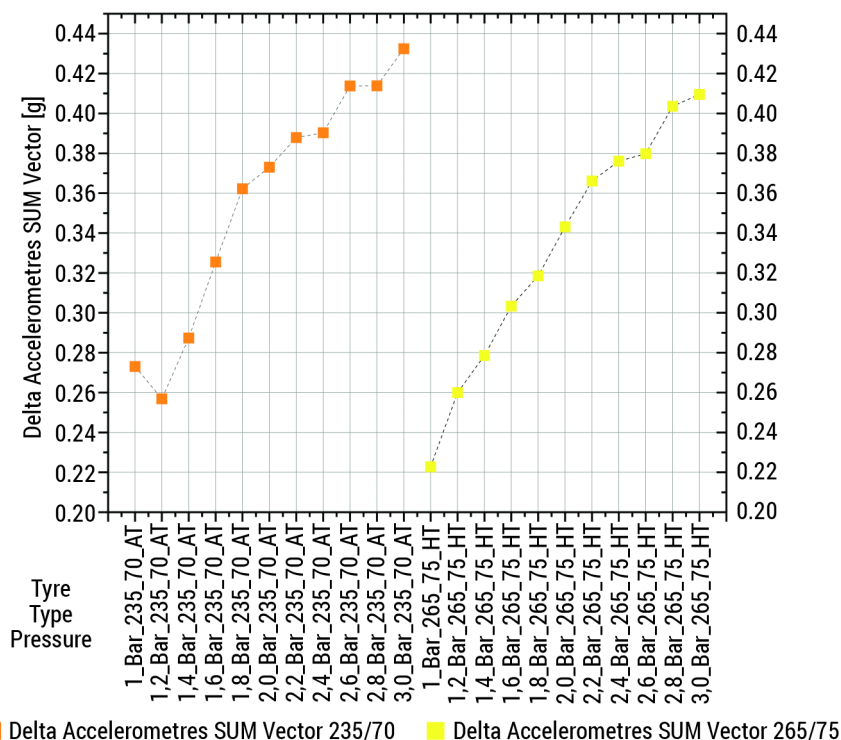


Figure 8. Delta accelerometers sum vector value

Source: own studies.

Throughout the entire tested range, lower delta values were recorded for the higher-profile tires. This indicates better damping of shock impacts, such as when a wheel hits a deeper pothole. At a pressure of 2.4 bar, the 235/70 tire reached an acceleration delta of 0.3903 g, while for the 265/75 tire, it was 0.3761 g.

Due to the fact that the representation of the signal in the time domain is not fully clear Figure 9 shows the pressure exerted on the plates by the vehicle's right wheel only for the comparative pressure of 2.4 bar. At this pressure, the 235/70 tire showed higher amplitude values compared to the lower-profile tire.

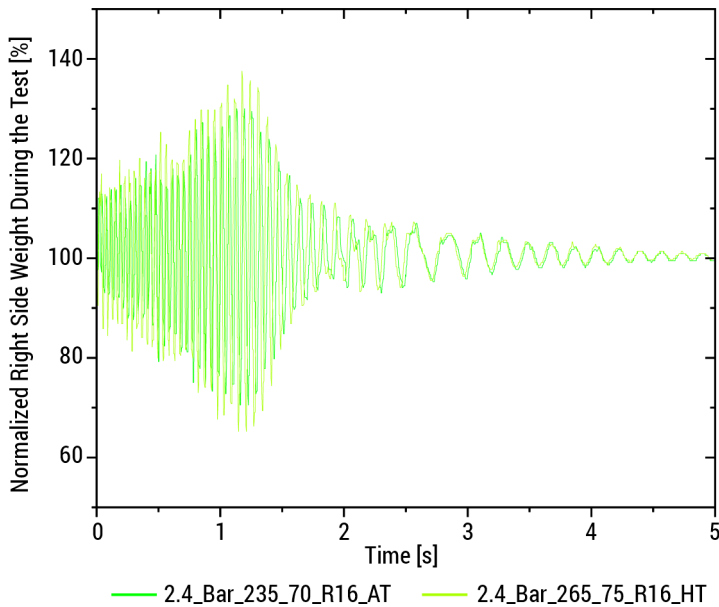


Figure 9. Normalized right side weight during the test

Source: own studies.

Higher amplitude values were observed throughout the entire range of the test.

4. Conclusions

The study conducted for two types of tires with different dimensions led to interesting conclusions. The type of tires and their pressure had a substantial impact on the vehicle's suspension and the degree of wheel adhesion to the surface. In the above study, the difference in the height of the tire sidewall was 20.82%. The smaller tire had dimensions of 235/70R16, while the larger one was 265/75R16. The test was conducted within the pressure range of 1 to 3 bars, with steps of 0.2 bars.

The highest adhesion percentage to the ground relative to SAE was achieved for both tires at the lowest pressure of 1 bar. It was 89% for the 235/70 tire and 87.5% for the 265/75 tire.

The lowest observed adhesion to the ground occurred at the highest pressures of 3 bars. For the 235/70 tire, it was 59%, and for the 265/75 tire, it was 57%.

A few-kilogram difference in vehicle weight readings between the tests resulted from the tolerance of the testing equipment and the varying distribution of weight on the test plates at different tire pressures.

The delta of the normalized values (the difference between the maximum and minimum values in the test) of the tire's adhesion to the surface indicated the lowest value of 26.33 percentage points for the 265/75 tire at 1 bar pressure.

(Data for 1 bar for the 235/70 tires was lost). The highest values occurred for the 265/75 tire at 3 bars of pressure and were 83.74%.

It was observed that as the pressure increased, the difference between the maximum and minimum pressure readings on the plates increased almost linearly.

Three comparative values for the sum of the triaxial accelerometer vector X, Y, Z were determined. These were the delta of the vector sum (the difference between the maximum and minimum values in the test), the mean value, and the RMS value. All parameters were determined for the vector sum.

The highest values of delta, mean, and RMS occurred for the 235/70 tire at 3 bars of pressure. They were 0.3903 g, 0.0641 g, and 0.0903 g, respectively.

The lowest average and RMS values were obtained for the 265/75 tire at 1.4 bars of pressure, which were 0.0560 g and 0.0739 g, respectively.

For the delta, the lowest value was 0.2228 for the 265/75 tire at 1 bar of pressure. For the 265/75 tires, a decrease in the average and RMS values was observed from 1 to 1.4 bars, and only from 1.6 bars did the values start increasing. For the mean value of the vector sum, it was not until the 3 bar pressure that it reached the same level as at 1 bar, which is an unexpected phenomenon. This indicates that the tire significantly changes its frequency characteristics depending on the pressure.

The results of the tests indicate the significant impact of tire type, dimensions, and inflation pressure on the degree of wheel adhesion and the perceptible vibrations experienced by the driver.

Literature

- [1] Xiong, Y., Tuononen, A. (2014). A laser-based sensor system for tire tread deformation measurement. *Measurement Science and Technology*, 25(11), 115103.
- [2] Gao, X., Xiong, Y., Liu, W., Zhuang, Y. (2021). Modeling and experimental study of tire deformation characteristics under high-speed rolling condition. *Polymer Testing*, 99, 107052.
- [3] Zhao, W., Zhang, C., Zhang, J. (2020). Continuous measurement of tire deformation using long-gauge strain sensors. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 142(2), 106782.
- [4] Xiong, Y., Tuononen, A. (2015). Rolling deformation of truck tires: Measurement and analysis using a tire sensing approach. *Journal of Terramechanics*, 61(1), 33–42.
- [5] Prażnowski, K., Bieniek, A., Mamala, J., Graba, M. (2016). Pomiar odkształcenia dynamicznego opony samochodu w oparciu o optyczny system pomiarowy PONTOS. *Mechanik*, 11, 1724–1725.
- [6] Chang, W.-H., Juang, R.-T., Huang, M.-H., Sung, M.-F. (2021). Estimation of tire mileage and wear using measurement data. *Electronics*, 10(20), 2531.
- [7] Mamedes, C., Schön, C. G. (2014). The role of tire size over the fatigue damage accumulation in vehicle bodies. *Procedia Materials Science*, 3, 331–335.

Climate-smart farming with mobile agrivoltaics: A polish case study on soybean and buckwheat under field conditions

Michał Kiedrowski, Anna Wenda-Piesik*

Department of Agronomics,

Faculty of Agriculture and Biotechnology,

Bydgoszcz University of Science and Technology,

Aleje Prof. S. Kaliskiego 7, 85-796 Bydgoszcz, Poland

**mickie001@pbs.edu.pl*

Abstract: This study investigates the impact of a mobile agrivoltaic system on soybean and buckwheat cultivation in Poland. Field trials showed that mobile shading improved microclimate conditions, enhanced physiological traits, and increased soybean yield, while buckwheat showed mixed responses. Results demonstrate the potential of mobile AV as a climate-smart solution for temperate field cropping.

Key words: mobile agrivoltaic systems, temperate agriculture, dual land use, crop productivity, climate adaptation

1. Introduction

Climate-Smart Agriculture (CSA) is a strategic approach promoted by the Food and Agriculture Organization (FAO) to sustainably increase agricultural productivity, build resilience to climate change, and reduce greenhouse gas emissions. As defined by Lipper et al. [1], CSA integrates the “three pillars” of food security, climate adaptation, and mitigation into a cohesive policy and technological framework. Under this global vision, agrivoltaic systems emerge as a practical realization of CSA principles, particularly in land-constrained or climate-stressed regions. AV systems enhance land-use efficiency by simultaneously producing crops and renewable energy, aligning with goals to reduce emissions and increase resilience of food systems.

Recent studies emphasize that agrivoltaics not only reduces dependency on fossil fuels but also helps buffer crops from extreme weather events – such as heatwaves or radiation stress – by creating moderated microclimates [2]. In arid regions, AV systems can reduce evapotranspiration losses, while in temperate climates like Central Europe, they may reduce photoinhibition and thermal stress during summer peaks [3]. The increasing demand for sustainable land use and renewable energy production has accelerated the development of agrivoltaic systems (AV), which combine agricultural production and photovoltaic (PV) energy generation on the same land area. AV systems modify the microclimate beneath the panels – most notably,

they affect solar radiation (PAR), soil temperature, air humidity, and water availability. These changes, while potentially limiting for some crops, can also enhance physiological traits, water-use efficiency, and yield stability under certain conditions [4].

A growing body of research has shown that AV can support crop growth through partial shading and microclimate regulation, particularly in arid and semi-arid zones [4,5]. However, in temperate climates, the results are mixed and crop-dependent. Most European studies to date have focused on static, elevated AV systems used in orchards or horticulture [5], with limited empirical data on field-scale applications for annual crops such as legumes or pseudocereals.

This study presents the first mobile agrivoltaic installation (MIA) applied to field crops in Poland, designed and implemented as a prototype within the AgroPV project. Unlike static systems, the MIA prototype allows dynamic movement along crop rows, enabling transient and controlled shading throughout the day. We selected two economically and nutritionally valuable species: soybean (*Glycine max*), a high-protein legume of increasing importance for both feed and human diets, and buckwheat (*Fagopyrum esculentum*), a pseudocereal rich in bioactive compounds, well-suited for gluten-free and low-input cropping systems. Our case study contributes to this global narrative by showing that mobile agrivoltaic platforms can apply CSA strategies in a modular, regionally adaptable way, offering technological flexibility and compatibility with mechanized field agriculture. The ongoing integration of fertigation into the MIA system further reflects CSA's goal of smart input use and resource-efficient intensification.

The main aim of the study was to evaluate the effect of mobile agrivoltaic shading on physiological response, growth dynamics, and yield performance of soybean and buckwheat under temperate field conditions. The analysis included microclimatic factors, evapotranspiration, plant density, plant height, seed yield, and photosynthetic indicators (LAI, SPAD, PSII). The findings contribute to the growing European evidence base on AV feasibility for dual-use land systems. This conceptual framework builds on early feasibility studies such as those by Dupraz et al. [6].

2. Materials and methods

2.1. Experimental site and soil characteristics

The field experiment was conducted in 2024 at the Agricultural Experimental Station in Minikowo, Poland (52°21' N; 16°56' E). The trial was established on sandy loam soil with the following particle composition: 80.5% sand, 17.6% silt (loam), and 1.9% clay. The soil had a slightly acidic pH of 6.7 and contained 1.6% organic matter. Nutrient availability in the topsoil included 0.45% nitrate nitrogen (NO_3^-), 185 mg·kg⁻¹ phosphorus (P), and 235 mg·kg⁻¹ potassium (K).

2.2. Experimental design and crop species

The field was divided into two treatment blocks (0.5 ha each): one under a mobile agrivoltaic installation (MIA) and the other under conventional full-sun cultivation (control). Within each block, two crop species were cultivated: soybean (*Glycine max* (L.) Merr.) and buckwheat (*Fagopyrum esculentum* Moench). The size of each crop plot was 8.7×20 m. Standard sowing dates and agronomic practices were followed for both species.

2.3. Mobile agrivoltaic installation (MIA)

The MIA used in this study was a prototype developed under the AgroPV project. The installation consisted of a 4×4 motorized platform with bifacial PV panels mounted on three wings (central fixed, front and rear adjustable from 0° to 35° tilt). The structure moved linearly along crop rows at 25–200 m/h, controlled by an astronomical timer and powered by a 24 V battery bank. The entire array was elevated 90 cm above ground to allow unimpeded crop growth underneath.

The system mimicked transient cloud-like shading by moving across the field from sunrise to sunset, resulting in approximately 30% daily shading per crop row. Total power output reached 24 kWh, and energy was stored in a 25 kWh battery system. Additional features included GPS positioning, LTE remote monitoring, and hybrid inverters.

2.4. Meteorological and microclimatic monitoring

Meteorological conditions, including maximum and minimum air temperatures, average daily temperature, and precipitation, were recorded from April to August 2024. Real evapotranspiration (ETEC) was measured using a LI-COR EddyFlux system (eddy covariance method). Soil moisture was expressed as field capacity percentage (FC), and the hydrothermal coefficient (K) was calculated using the formula: $K = (10 \times P) / t$, where P is total precipitation and t is the sum of daily mean temperatures.

2.5. Agronomic and physiological measurements

The following variables were evaluated for each treatment:

- I. Plant density after emergence ($\text{plants} \cdot \text{m}^{-2}$),
- II. Canopy height at flowering (cm),
- III. Seed yield (kg per plot),
- IV. Leaf Area Index (LAI) using standard hemispherical imaging,
- V. Chlorophyll content (SPAD index) using a chlorophyll meter,
- VI. Photosystem II efficiency (PSII) based on chlorophyll fluorescence.

PAR (photosynthetically active radiation) measurements were taken above the canopy and near the soil surface using quantum sensors, to assess light distribution under shading.

All data were analyzed using homogeneity of variances (*F* ratio) and *t*-Student tests for independent variables (MIA vs. control treatments) across the species. Mean comparisons were performed at $p < 0.05$. Statistical analysis was conducted in Statistica software (version 13.0). This allowed us to determine whether differences in physiological parameters and yields between MIA and control treatments were statistically significant.

3. Results

The results of the experiment clearly demonstrate that mobile agrivoltaic installations significantly influenced the microclimatic and physiological environment of the crops. Most notably, maximum air temperatures were reduced by 5–7°C under MIA, while minimum temperatures increased slightly, creating a more buffered thermal profile (Table 1).

Table 1. Summary of meteorological and microclimatic parameters under mobile agrivoltaic installation (MIA) and control conditions during the 2024 growing season

Treat- ment	Crop	T _{max} (°C)	T _{min} (°C)	Avg Temp. (°C)	Preci- pitation (mm)	Hydro-thermal Coefficient (K)	Soil Moisture (FC,%)	ETEC (mm)
Control	Soybean	33.6	5.5	15.6	347	1.45	74	78.2
MIA	Soybean	26.5	7.5	15.1	347	1.50	55	86.4
Control	Buck- wheat	32.5	5.1	15.8	347	1.44	75	68.5
MIA	Buck- wheat	27.0	7.5	15.1	347	1.50	70	72.4

Source: own studies.

These conditions likely contributed to enhanced water-use efficiency, especially in soybean, where actual evapotranspiration (ETEC) increased under MIA despite similar total rainfall (Figure 1). Shading increased water use efficiency, especially in soybean.

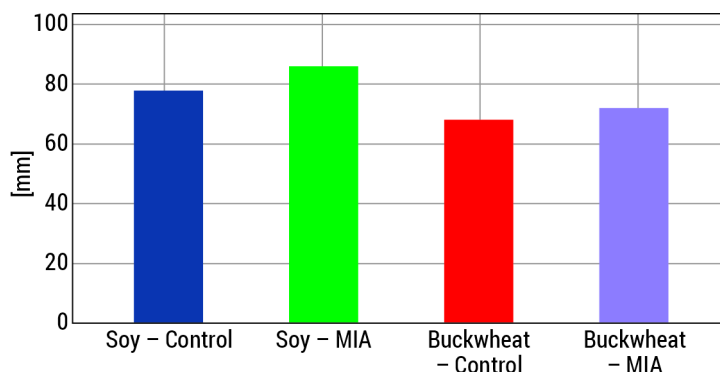


Figure 1. Actual evapotranspiration (ETEC, mm) measured by Eddy Covariance method in MIA and control plots

Source: own studies.

The plant density of soybean consistently amounted at MIA and control plot the established 40 plants/m² while the buckwheat density was slightly reduced under MIA by 5 plant per square meter (Figure 2).

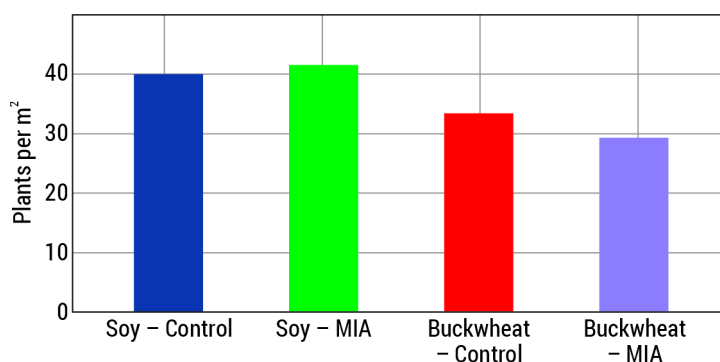


Figure 2. Plant density (plants/m²) of soybean and buckwheat under MIA and control conditions. Mean values based on post-harvest stand counts

Source: own studies.

Morphologically, both crops grew taller under MIA. This increase in height, particularly evident in buckwheat (+11 cm), suggests a shade avoidance response (Figure 3). However, it did not negatively affect standability or reproductive development. Soybean under MIA also achieved significant, higher leaf area index (LAI), indicating increased leaf biomass and potentially greater canopy photosynthetic capacity (Figure 4). Vertical growth was enhanced under partial shading conditions.

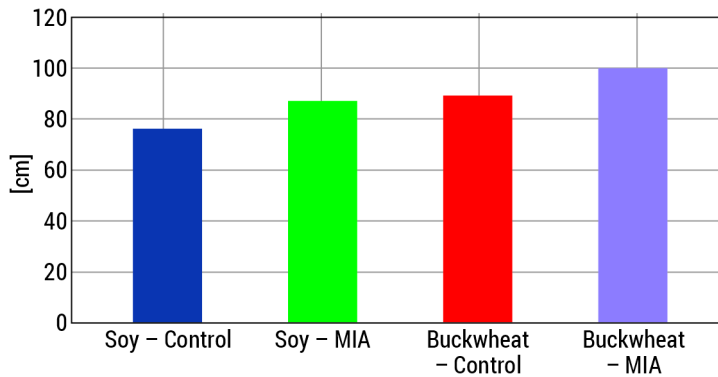


Figure 3. Plant height (cm) of soybean and buckwheat at flowering stage in MIA and control treatment

Source: own studies.

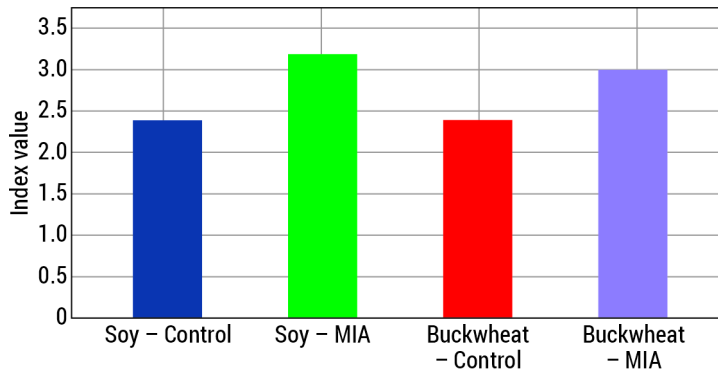


Figure 4. Leaf Area Index (LAI) values for soybean and buckwheat measured during peak vegetative development. Higher values were observed in MIA plots for both crops.

Source: own studies.

This supports the hypothesis that crop-specific light requirements and phenology must be matched carefully to AV design and shading regimes. The improved SPAD and PSII values under MIA for both species confirm that photosynthetic performance was not impaired by intermittent shading (Figs. 5 and 6).

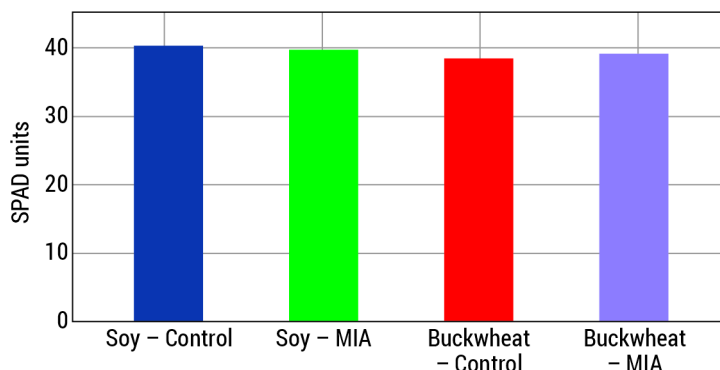


Figure 5. SPAD index as an indicator of chlorophyll content in soybean and buckwheat under MIA versus control. SPAD values reflect leaf greenness and photosynthetic capacity

Source: own studies.

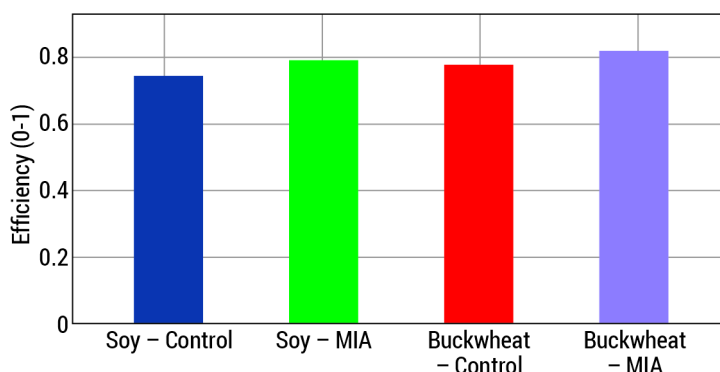


Figure 6. Photosystem II efficiency (PSII) in soybean and buckwheat grown under MIA and control conditions. Data suggest improved photochemical efficiency under MIA

Source: own studies.

Interestingly, seed yield outcomes diverged between crops: soybean benefited from the mobile shading with a significant (+16%) yield increase, while buckwheat yield decreased insignificantly under MIA.

In summary, mobile shading provided clear microclimatic benefits for both crops, with significant ($p < 0.05$) yield improvement observed in soybean (+16%), while the slight yield decrease in buckwheat was not statistically significant. These findings underline the crop-specific nature of responses to dynamic shading and indicate that further optimisation of MIA regimes is needed to match crop light requirements.

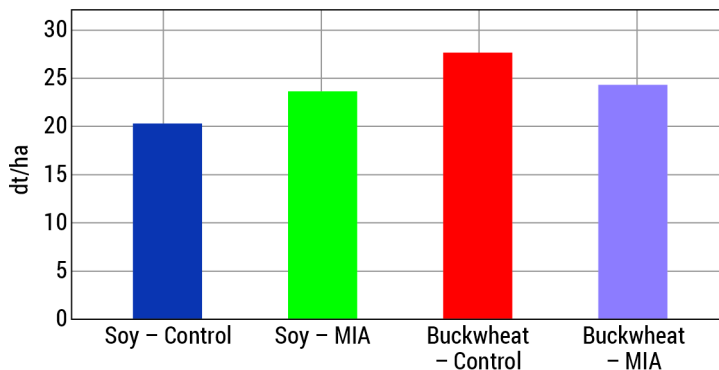


Figure 7. Seed yield (dt/ha) of soybean and buckwheat cultivated under MIA and in full sun (control). Data represent plot-scale harvest measurements

Source: own studies.

5. Discussion

The physiological and yield responses observed here align with recent findings from Germany [3], and Korea [7], but this study is among the first to confirm the viability of mobile AV systems for full-season field crops in Central Europe. The dynamic nature of shading appears to mitigate potential negative effects of light reduction while preserving energy generation, confirming MIA's potential as a dual-use innovation.

The results of this study demonstrate that mobile agrivoltaic installations (MIA) can play a transformative role in sustainable crop production in temperate climates such as Poland's, located around 53°N latitude. In contrast to fixed agrivoltaic systems developed mainly in Mediterranean [8] or subtropical regions [9], mobile AV allows for transient shading, reducing the negative impact of constant PAR reduction while creating favorable microclimates for specific crops.

5.1. Land use duality and the Central European context

With increasing pressure to meet renewable energy goals, many countries are facing competition for arable land. Ground-mounted solar power plants are often located on agricultural lands, raising concerns about food security and land-use conflicts [10]. This issue is especially sensitive in countries with limited agricultural land per capita, such as those in Central Europe. Agrivoltaics offer a potential solution by enabling dual-use systems that combine energy production and agriculture on the same area [11].

In Poland and similar latitudes, field crops dominate the agricultural landscape, and any AV system must be compatible with large-scale mechanization, crop rotation, and local phenology. The mobile nature of the MIA system introduced

in this study is particularly suited for such environments, avoiding permanent infrastructure and allowing dynamic light management.

5.2. Energy for agriculture, not against it

One key premise behind this study is that energy should empower agriculture, not displace it. Systems such as MIA provide on-site renewable energy, which can be used to support precision farming tools, fertigation, or autonomous irrigation systems. This aligns with the regenerative agrivoltaic models proposed in recent literature [12]. The integration of fertigation into MIA, currently under development, represents a step toward smart agri-energy ecosystems [13]. This approach aligns with broader strategies for smart farming and local energy resilience [14].

5.3. Microclimate benefits and physiological responses

As shown in this trial, mobile AV moderated extreme temperatures, improved soil moisture retention, and enhanced physiological traits like LAI, SPAD, and PSII. These effects are particularly important as climate variability intensifies, with longer dry spells and heatwaves predicted for Central Europe. As found by Weselek et al. [4], shading can reduce photodamage and thermal stress while enhancing photosynthetic stability in certain crops.

Soybean responded positively in terms of yield under MIA, while buckwheat showed slight reductions, reinforcing findings from other studies that shade-tolerance is species- and cultivar-dependent [15, 16].

5.4. Potential for modular expansion

The modular, lightweight structure of MIA makes it scalable and adaptable. Unlike fixed AV installations that require foundations and permanent PV modules, MIA can be replicated, relocated, and redesigned seasonally. The implementation of fertigation and real-time monitoring positions MIA as a smart, mobile infrastructure rather than a static energy overlay. Future developments may include soil sensors, wireless data networks, and semi-autonomous navigation to optimize shading patterns [17, 18].

5.5. Policy and regulatory frameworks

Despite their potential, mobile AV systems remain underrepresented in policy and incentive structures. In many countries, including Poland, legislation does not yet differentiate between static and mobile AV setups, nor does it offer clear land classification or subsidies for dual-use innovations. Lessons from China [19] and Latin America [20] highlight the need for multi-actor governance to prevent

land misuse and ensure stakeholder cooperation. Public awareness and farmer involvement must be integral to AV deployment strategies.

5.6. Future perspectives and limitations

While the results of this study are promising, several limitations must be acknowledged. First, the experiment was conducted during a single growing season, and interannual climate variability may alter crop responses. Second, only two crop species were tested, which limits the generalizability of the findings. Further research should identify which crops or cultivars respond positively to controlled shading and which are more susceptible to yield reduction, as well as investigate the quantitative relationship between daily solar radiation dose and yield outcomes.

Additionally, this study did not include a full economic assessment combining both agricultural and energy outputs. Although soybean yields improved under MIA, the slight reduction in buckwheat yields and the capital cost of the installation mean that the overall profitability of such systems should be evaluated using multi-year, integrated techno-economic models. Long-term trials should also assess impacts on soil health, pest dynamics, and rotational performance [16, 21].

6. Conclusions

This study demonstrates that mobile agrivoltaic systems (MIA) have the potential to enhance crop performance and microclimate regulation in temperate field conditions. Soybean showed a statistically significant yield benefit under dynamic shading, while buckwheat exhibited a slight, non-significant reduction in yield. These results suggest that MIA may be a valuable component of climate-smart agriculture, but the economic feasibility will depend on crop choice, local climatic conditions, and integration with energy production. Further research should refine crop-specific shading regimes and develop full cost–benefit analyses before large-scale deployment.

Literature

- [1] Lipper, L., Thornton, P., Campbell, B. M., Baedeker, T., Braimoh, A., Bwalya, M., Caron, P., Cattaneo, A., Garrity, D., Henry, K., Hottle, R., Jackson, L., Jarvis, A., Kossam, F., Mann, W., McCarthy, N., Meybeck, A., Neufeldt, H., Remington, T., Sen, P. T., Sessa, R., Shula, R., Tibu, A., Torquebiau, E. F. (2014). Climate-smart agriculture for food security. *Nature Climate Change*, 4, 1068–1072.
- [2] Santhosh, R., Baskaran, R., Harisudan, C., Prabhakaran, J., Bharathi Kumar, K. (2025). Agrivoltaic farming: A sustainable approach for climate-smart agriculture. *Plant Science Today*, 12(sp1), 01–09.

- [3] Weselek, A., Bauerle, A., Hartung, J., Zikeli, S., Lewandowski, I., Högy, P. (2021). Agrivoltaic system impacts on microclimate and yield in temperate conditions. *Agronomy for Sustainable Development*, 41(5), 59.
- [4] Weselek, A. (2022). *Impacts of agrophotovoltaics in Central Europe* [Unpublished doctoral dissertation]. University of Hohenheim. <https://www.researchgate.net/publication/364994447>
- [5] Ghasemi, H., Sadeghkhani, I. (2025). Toward sustainable energy – Agriculture synergies: A review of agrivoltaics systems. *Solar RRL*, 9(11), 2500041.
- [6] Dupraz, C., Marrou, H., Talbot, G., Dufour, L. (2011). Combining solar panels and food crops for optimizing land use: Towards new agrivoltaics schemes. *Renewable Energy*, 36(10), 2725–2732.
- [7] Kim, Y., Kim, S. (2025). Economic analysis of biofuel production in agrophotovoltaic systems using building-integrated photovoltaics in South Korea. *Energies*, 18(8), 1949.
- [8] BenGhida, D., BenGhida, S. (2019). Investment in agrophotovoltaics: Efficient solutions from Switzerland. *International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering*, 8(12), 61–64.
- [9] Vezzoni, R. (2025). Farming the sun: The political economy of agrivoltaics in the European Union. *Sustainability Science*, 20(4), 1519–1534.
- [10] Zhang, S., He, Y. (2013). Analysis on the development and policy of solar PV in China. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 21, 393–401.
- [11] Singla, M. K., Gupta, J., Gupta, A., Safaraliev, M., Zeinoddini-Meymand, H., Kumar, R. (2024). Empowering rural farming: Agrovoltaic applications for sustainable agriculture. *Energy Science & Engineering*, 13(1), 35–59.
- [12] Jamil, U., Pearce, J. M. (2025). Regenerative agrivoltaics: Integrating photovoltaics and regenerative agriculture for sustainable food and energy systems. *Sustainability*, 17(11), 4799.
- [13] Ukwu, U. N., Muller, O., Meier-Grüll, M., Uguru, M. I. (2025). Agrivoltaics enhanced the microclimate, photosynthesis, growth and yields of mungbean in tropical Nigeria. *Scientific Reports*, 15, 1190.
- [14] Wielgat, R., Kołodziej, A., Candela, L., Lisowska-Lis, A., Jasielski, J., Chlastawa, Ł. A., Touhami, M., Jaramillo, M. F. (2024). A concept of smart agrophotovoltaic tunnels: Energy and irrigation management across climate zones. *IEEE Access*, 12, 40765–40794.
- [15] Mittelman, G., Atiya, V., Vitoshkin, H., Hernández, R. Ravishankar, E., Kribus, A. (2025). *The economic potential of open field agrivoltaics with spectral beam splitting*. Available at SSRN: <https://ssrn.com/abstract=5126392> or <http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.5126392>
- [16] Adeg, E. H., Selker, J. S., Higgins, C. W. (2018). Remarkable agrivoltaic influence on soil moisture, microclimate and water-use efficiency. *PLOS ONE*, 13(11), e0225409.

- [17] Zahrawi, A. A., Mousaad Aly, A. (2024). A review of agrivoltaic systems: Addressing challenges and enhancing sustainability. *Sustainability*, 16(18), 8271.
- [18] Gong, W., Zhang, L., Gong, J., Geng, X., Wang, L., Deng, L., Wu, C., Bao, E. (2025). Regulatory effect of agriphotovoltaic systems with different panel heights on the thermal environment. *Scientific Reports*, 15, 11196.
- [19] Peña-Calzada, K., Toledo, C., Garciga, J. P., Barrera-Cardoso, E. L., Iriondo-Pérez,, M. E., Sotolongo-Hernández, E., Scognamiglio, A. (2025). Advances and challenges of agrivoltaic in the Americas: A look at its current situation. *Agroforest Systems*, 99(1), 8.
- [20] Weselek, A., Bauerle, A., Zikeli, S., Lewandowski, I., Schindele, S., Högy, P. (2019). Agriphotovoltaic systems: applications, challenges, and opportunities. *Agronomy for Sustainable Development*, 39, 35.

Pomiar entalpii przepływającego medium

Leszek Bargłowski, Mariusz Adamski*

Katedra Ciepłownictwa, Ogrzewnictwa i Wentylacji

Wydział Budownictwa i Nauk o Środowisku

Politechnika Białostocka

**leszek.barglowski@st.pb.edu.pl*

Abstract: This article presents the definition of enthalpy in relation to heating using the example of a convection radiator and the equations for calculating enthalpy. Equations for calculating the enthalpy of a flowing fluid and the volume flux based on fluid velocity measurements are also given, as well as formulas for calculating the heat that can be transferred to a room by a radiator. Equations for calculating the errors of calculated quantities from the measured errors of measured quantities are also given.

Key words: enthalpy, triple point, Bernoulli equation, dynamic pressure, radiator

1. Wstęp

Współczesne systemy inżynierii procesowej, energetycznej i chemicznej w coraz większym stopniu opierają się na precyzyjnych pomiarach parametrów termodynamicznych przepływających mediów. Jednym z kluczowych, odgrywającym istotną rolę w analizie bilansu energetycznego, jest entalpia. Pomiar entalpii przepływającego medium umożliwia ocenę efektywności procesów cieplnych, kontrolę zużycia energii oraz identyfikację strat energetycznych. Ze względu na złożoność bezpośredniego pomiaru entalpii w praktyce wykorzystuje się różne metody pośrednie, bazujące na rejestracji temperatury, ciśnienia oraz składu fizykochemicznego substancji. Celem niniejszego artykułu jest przedstawienie jednej z metod pomiaru entalpii w układach przepływowych, omówienie dostępnych technologii pomiarowych oraz analiza wyzwań związanych z dokładnością i niezawodnością pomiarów w warunkach rzeczywistych.

2. Entalpia

Entalpia jest to wielkość fizyczna opisująca całkowitą energię układu, zawierającą jego energię wewnętrzną związaną z ruchem cząsteczek, wiązaniami chemicznymi itp. oraz energię związaną z objętością układu i ciśnieniem zewnętrznym. Jest niezbędna w opisie zjawisk dotyczących wymienników ciepła i pomp ciepła [1–3], zmiany fazy [4], instalacji wykorzystujących energię słoneczną [5] i wielu innych zagadnień.

Ogólny wzór na entalpię (1), bez uwzględniania reakcji chemicznych [6, 7], jest następujący [8, 9]:

$$H = U + pV \quad (1)$$

gdzie:

H – entalpia,

U – energia wewnętrzna,

p – ciśnienie,

V – objętość.

Entalpia to suma energii wewnętrznej U i iloczynu pV , który jest równy pracy, jaką należy wykonać nad otoczeniem, aby w danych warunkach uzyskać miejsce na układ [10]. Wszystkie wielkości definiujące entalpię są parametrami stanu [11], dlatego entalpia też jest funkcją stanu. Wówczas, gdy układ wykonuje wyłącznie pracę objętościową, a ciśnienie jest stałe (tzn. zmiany ciśnienia są pomijalnie małe wobec wartości ciśnienia w badanym układzie), zmiana entalpii (2) jest równa ciepłu Q dostarczonemu do układu [12]:

$$dH = dQ \quad (2)$$

Praktyczne zastosowanie może służyć do określenia energii cieplnej Q wypromieniowanej z grzejnika, jako różnicy entalpii czynników wpływającego i odpływającego z grzejnika. Różne media (np. woda, powietrze, para wodna, olej, amoniak) mają inne wartości entalpii przy tych samych warunkach, gdyż różnią się:

- gęstością,
- ciepłem właściwym,
- stanem fazowym (np. woda, para – tabela 1).

Znaczenie ma bowiem nie całkowita wartość entalpii, a jej zmiany. W ciepłownictwie i ogrzewnictwie przyjęto umownie, że entalpia jest równa zero dla wody w punkcie potrójnym ($T_{tr} = 273,16$ K, czyli $t_{tr} = 0,01^{\circ}\text{C}$). W przybliżeniu można zastąpić punkt potrójny punktem 0°C [13].

Dokładny wzór na entalpię właściwą wody to:

$$h = c_w(T - T_{tr}) \quad (3)$$

zaś wzór przybliżony to:

$$h = c_w t \quad (4)$$

gdzie:

c_w – ciepło właściwe wody,

h – entalpia właściwa (czyli odniesiona do jednostkowej masy lub ilości substancji),

T – temperatura wyrażona w Kelvinach,

t – temperatura w stopniach Celsjusza.

Przyrost entalpii występuje w sprężarkach, natomiast zmniejszenie entalpii – w turbinach cieplnych. Entalpia jest bardzo często wykorzystywaną w obliczeniach funkcją stanu.

Tabela 1. Entalpie właściwe wybranych substancji

Medium	Entalpia właściwa (w przybliżeniu) przy 25°C, 1 bar
Woda (ciecz)	około 104 kJ/kg
Para wodna	około 2676 kJ/kg
Powietrze	około 300 kJ/kg (zależnie od wilgotności)
Olej termalny	około 200–300 kJ/kg (zależnie od rodzaju oleju)

Źródło: opracowanie własne.

3. Objętość przepływającej cieczy

W celu wyznaczenia objętości przepływającej cieczy V (1) należy wyznaczyć prędkość v przepływu, zgodnie z równaniem Bernoulliego [14] opisującym zachowanie gęstości energii całkowitej na linii prądu (rysunek 1):

$$\frac{v_1^2}{2} + gh_1 + \frac{p_1}{\rho} = \frac{v_2^2}{2} + gh_2 + \frac{p_2}{\rho} \quad (5)$$

gdzie

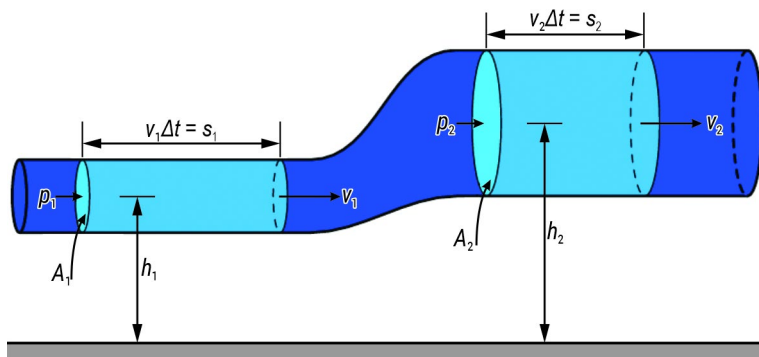
ρ – gęstość płynu;

v – średnia prędkość płynu w rozpatrywanym przekroju;

p – statyczne ciśnienie płynu;

h – wysokość osi strugi w układzie odniesienia, w którym liczona jest energia potencjalna;

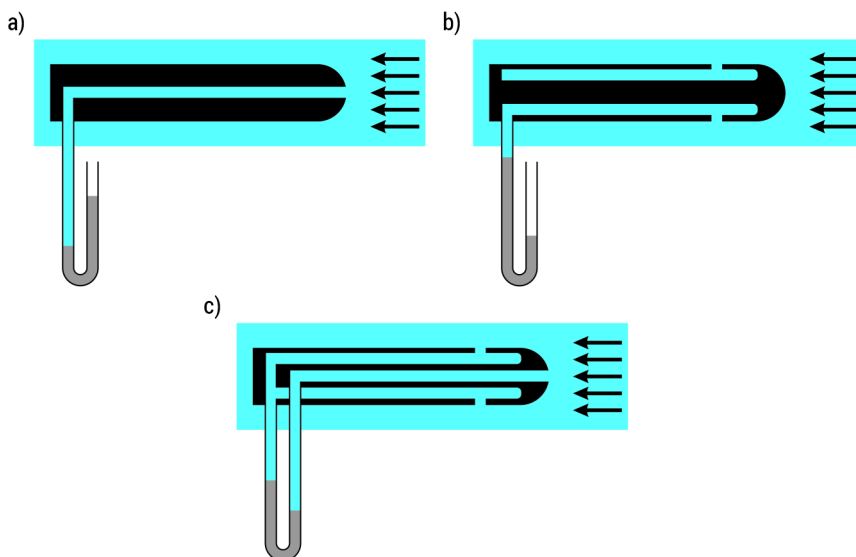
g – przyspieszenie grawitacyjne.



Rysunek 1. Ilustracja do równania ciągłości oraz równania Bernoulliego

Źródło: [15].

Do wyznaczania ciśnienia całkowitego stosuje się rurki Pitota. Prędkość strugi cieczy można wyznaczyć w oparciu o pomiary sondą Prandtla (rysunek 2).



Rysunek 2. Rurki pomiarowe: a) rurka Pitota, b) sonda mierząca ciśnienie statyczne, c) sonda Prandtla

Źródło: [16].

Równanie Bernoulliego (5) jest równaniem zachowania energii napisanym dla dwóch wybranych przekrojów strugi cieczy i jednostkowej masy cieczy (rysunek 1). Energia całkowita strugi cieczy jest sumą energii kinetycznej $mv^2/2$, potencjalnej mgh i wewnętrznej cieczy pV . Dla jednostkowej masy cieczy składnikami są: ciśnienie dynamiczne $v^2/2$, gh oraz p/ρ . Dla jednostkowej objętości cieczy to natomiast: ciśnienie dynamiczne $\rho v^2/2$, ρgh oraz ciśnienie statyczne p .

Gdy oś strugi cieczy jest pozioma ($h_1 = h_2$), energia potencjalna nie zmienia się:

- Ciśnienie statyczne p to ciśnienie wywierane przez ciecz wtedy, gdy jest ona w stanie spoczynku. Mierzy się je prostopadle do powierzchni cieczy i pozostaje ono niezależne od kierunku przepływu.
- Ciśnienie dynamiczne p_d to ciśnienie wywierane przez ruch płynu. Jest mierzone równolegle do kierunku przepływu i zależy od prędkości płynu.
- Ciśnienie całkowite p_c , zwane także ciśnieniem stagnacji, jest sumą ciśnienia statycznego i ciśnienia dynamicznego (rysunek 3):

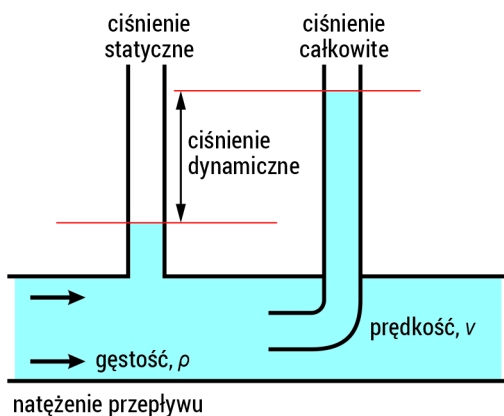
$$p_c = p + p_d \quad (6)$$

Ciśnienie dynamiczne określa następujący wzór:

$$p_d = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^2 \quad (7)$$

Ta relacja pokazuje, że ciśnienie dynamiczne cieczy jest proporcjonalne do kwadratu jej prędkości. Znając ciśnienie dynamiczne cieczy, możemy zatem określić prędkość v przepływającej cieczy:

$$v = \sqrt{\frac{2p_d}{\rho}} \quad (8)$$



Rysunek 3. Graficzne wyjaśnienie ciśnień statycznego, dynamicznego i całkowitego

Źródło: [17]; tłumaczenie opisów: autor.

W celu obliczenia objętości V (1) przepływającej cieczy należy znać prędkość cieczy v [m/s] (8), pole przekroju A [m²] i czas przepływu t [s].

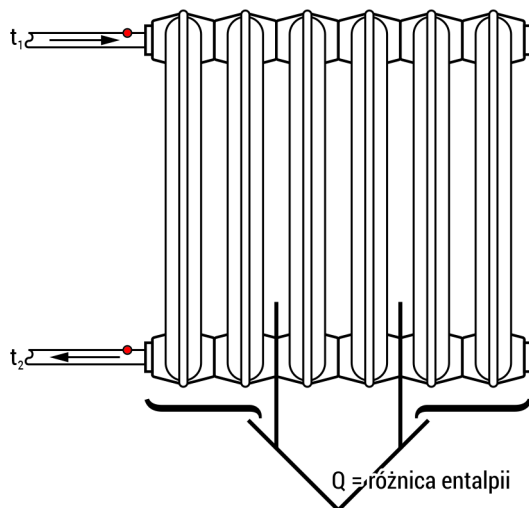
Szukany wzór na objętość przepływającej cieczy V będzie wyglądał następująco:

$$V = A \cdot \sqrt{\frac{2p_d}{\rho}} \cdot t \quad (9)$$

Znając objętość V i uwzględniając temperaturę, można wyznaczyć entalpię cieczy.

4. Energia termiczna

Energia termiczna (zwana też potocznie energią cieplną) to część energii wewnętrznej układu, która jest związana z chaotycznym ruchem cząsteczek układu. Miarą energii termicznej jest temperatura.



Rysunek 4. Rysunek grzejnika konwekcyjnego z oznaczeniami

Źródło: opracowanie własne.

Ogólny wzór na energię cieplną Q [18, 19], wypromieniowaną z grzejnika konwekcyjnego (rysunek 4), można zapisać następująco:

$$Q = V \cdot \rho \cdot c_p \cdot (t_1 - t_2) \quad (10)$$

gdzie:

Q – energia cieplna [kWh] przekazana przez grzejnik do pomieszczenia,
a więc możliwa do zarejestrowania przez podzielnik kosztów [20];

V – objętość przepływającej cieczy [m^3];

ρ – gęstość, dla wody $\approx 1000 \text{ kg/m}^3$;

c_p – ciepło właściwe przepływającej cieczy, przy czym dla wody $\approx 4200 \text{ J/(kg}\cdot\text{K)}$;

t_1 – temperatura cieczy na zasilaniu [$^{\circ}\text{C}$];

t_2 – temperatura na powrocie [$^{\circ}\text{C}$].

Stąd otrzymujemy następujące równanie na energię cieplną Q (10) jako różnicę entalpii:

$$Q = A \cdot \sqrt{2\rho p_d} \cdot t \cdot c_p \cdot (t_1 - t_2) = H_1 - H_2 \quad (11)$$

gdzie H_1 jest entalpią cieczy wpływającej, a H_2 cieczy wypływającej z grzejnika, czyli:

$$H_1 = A \cdot \sqrt{2\rho p_d} \cdot t \cdot c_p \cdot t_1 \quad (12)$$

$$H_2 = A \cdot \sqrt{2\rho p_d} \cdot t \cdot c_p \cdot t_2 \quad (13)$$

Wyznaczamy pochodną logarytmiczną dla powyższego równania na entalpię, obliczamy różniczkę zupełną i zakładamy, że wielkości we wzorze na otrzymanie entalpii są wyznaczane z błędami niezależnymi i przypadkowymi. Wówczas metodą Gaussa [21, 22] obliczamy niepewność wyznaczenia entalpii H . Względny błąd δ_H pomiaru entalpii H_1 lub H_2 określa nierówność:

$$\delta_{H1 \text{ lub } 2} \leq \sqrt{\delta_A^2 + \frac{1}{2}\delta_\rho^2 + \frac{1}{2}\delta_{pd}^2 + \delta_t^2 + \delta_{cp}^2 + \delta_{t1 \text{ lub } 2}^2} \quad (14)$$

Praktyczne znaczenie mają błędy związane z określeniem powierzchni przekroju A , ciśnienia dynamicznego p_d oraz temperatury t_1 . Względny błąd δ_H pomiaru entalpii spełnia nierówność:

$$\delta_{H1 \text{ lub } 2} \leq \sqrt{\delta_A^2 + \frac{1}{2}\delta_{pd}^2 + \delta_{t1 \text{ lub } 2}^2} \quad (15)$$

Energia cieplna pobrana przez urządzenia jest różnicą entalpii cieczy wpływającej i wypływającej z urządzenia. W przypadku pomiaru ilości ciepła możliwego do pobrania [23] rezygnuje się z pomiaru temperatury t_2 i zastępuje się go wartością temperatury odniesienia t_p . Wówczas entalpię cieczy odpływającej z urządzenia cieplnego przedstawia wzór:

$$H_2 = A \cdot \sqrt{2\rho p_d} \cdot t \cdot c_p \cdot t_p \quad (16)$$

Energię cieplną możliwą do pobrania przez urządzenie (grzejnik) można wówczas w sposób przybliżony wyrazić równaniem:

$$Q = A \cdot \sqrt{2\rho p_d} \cdot t \cdot c_p \cdot (t_1 - t_p) \quad (17)$$

z błędem:

$$\delta_Q \leq \sqrt{\delta_A^2 + \frac{1}{2}\delta_{pd}^2 + \delta_{t1}^2} \quad (18)$$

Ze względu na nierównomierność pól prędkości i temperatury w strudze cieczy należy oczekiwać, że najbardziej istotne będą błędy związane z pomiarami prędkości i temperatury cieczy.

5. Podsumowanie

W artykule podano definicję entalpii w odniesieniu do ogrzewania na przykładzie grzejnika konwekcyjnego, a także przedstawiono równania służące do jej obliczania.

Wyznaczono wzory do obliczania entalpii i strumienia objętościowego strugi płynącego płynu na podstawie pomiarów prędkości płynu i określonej wielkości przekroju strugi. Wyznaczono także wzory do obliczania ciepła przekazanego do pomieszczenia oraz ciepła możliwego do przekazania do pomieszczenia przez grzejnik.

Dysponowanie rozwiązaniami konstrukcyjnymi urządzeń zliczających ciepło przekazane przez grzejnik do pomieszczenia umożliwiłoby wyeliminowanie kontrowersyjnych, m.in. ze względu na nieodporność na anomalie pola temperatury na powierzchni grzejnika, podzielników kosztów na nich montowanych [24].

Przedstawiono także równania służące do obliczania błędów otrzymanych wielkości na podstawie błędów pomiarowych wielkości mierzonych.

Dalsze prace są realizowane są w kierunku zbudowania prototypu nowego urządzenia pomiarowego oraz opracowania metod obliczeniowych odpornych na anomalie pola temperatury na powierzchni grzejnika.

Opracowanie powstało w ramach pracy zespołowej WZ/WB-IIŚ/2/2025 w Katedrze Ciepłownictwa, Ogrzewnictwa i Wentylacji Wydziału Budownictwa i Nauk o Środowisku Politechniki Białostockiej, sfinansowanej ze środków MNiSW.

Literatura

- [1] Wang, S.-W., Cheng, J.-H., Zhang, C.-L. (2025). Enhancing dedicated outdoor air system heating performance in cold climates with integrated enthalpy heat exchanger and heat pump. *Energy and Buildings*, 345, 116052. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2025.116052>
- [2] Li, L., Zhang, H., Zhang, Z., Qi, F., Tu, Q., Wu, H., Yang, J., Zhang, X., He, M. (2025). Research and process optimization on frostless heat source tower heat pump system based on compound enthalpy enhancement. *International Journal of Refrigeration*, 177, 320–337. <https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2025.06.013>
- [3] Huang, Q., Jiang, H. (2025). Performance analysis of transcritical CO₂ air source heat pump system with different jet enthalpies. *Proceedings of SPIE – The International Society for Optical Engineering*, 13632, 1363202.
- [4] Dai, J., Bi, W., Yong, Y., Chen, W., Li, M., Ma, B., Yang, C. (2025). Direct numerical simulation and an empirical model of effective thermal conductivity for hybrid compounded phase change materials by an integrated enthalpy-based lattice Boltzmann model. *Physics of Fluids*, 37(7), 073631. <https://doi.org/10.1063/5.0274980>

- [5] Xiong, S., Shi, Y., Liu, C., Yang, Y. (2025). A photothermal energy storage phase change material with high stability and enthalpy. *RSC Advances*, 15(21), 17023–17030. <https://doi.org/10.1039/d5ra01422k>
- [6] Clark, J. (2013). *Various enthalpy change definitions*. <https://www.chemguide.co.uk/physical/energetics/definitions.html>
- [7] LibreTexts, Chemistry. (n.d.). *Enthalpy of reaction*. Retrieved August 11, 2025, from: [https://chem.libretexts.org/Bookshelves/General_Chemistry/Map%3A_Chemistry_-_The_Central_Science_\(Brown_et_al.\)/05%3A_Thermochemistry/5.04%3A_Enthalpy_of_Reaction](https://chem.libretexts.org/Bookshelves/General_Chemistry/Map%3A_Chemistry_-_The_Central_Science_(Brown_et_al.)/05%3A_Thermochemistry/5.04%3A_Enthalpy_of_Reaction)
- [8] Varbanov, P. S. (2013). Basic process integration terminology. In *Handbook of process integration (PI). Minimisation of energy and water use, waste and emissions* (pp. 28–78). Woodhead Publishing. <https://doi.org/10.1533/9780857097255.1.28>
- [9] Kumar, M. (2023). *Enthalpy change formula: Definition, methods, solved example*. <https://www.pw.live/school-prep/exams/enthalpy-change-formula>
- [10] Entalpia. (2025, August 11). In *Wikipedia*. https://pl.wikipedia.org/wiki/Entalpia#cite_note-4
- [11] Zintegrowana Platforma Edukacyjna. (n.d.). *Funkcja stanu*. Retrieved August 11, 2025, from: <https://zpe.gov.pl/a/przeczytaj/D8u0rsm5M>
- [12] Hyperphysics. (n.d.). *First law of thermodynamics*. Retrieved August 11, 2025, from: <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/thermo/firlaw.html#c2>
- [13] AGH. (n.d.). *Woda i para*. Retrieved May 8, 2025, from: http://galaxy.agh.edu.pl/~siwek/Maszyny_I_Urzedzenia_Energetyczne_2017/Z.4.%20Energetyka%20parowa/Woda-pa.pdf
- [14] Kąkol, Z., Żukrowski, J. (n.d.). *Statyka i dynamika płynów*. Retrieved August 11, 2025, from: <https://home.agh.edu.pl/~kakol/efizyka/w14/main14e.html>
- [15] Navier–Stokes equations. (2025, May 8). In *Wikipedia*. https://userpages.umbc.edu/~squire/reference/Navier-Stokes_equations.htm
- [16] Rurka Pitota. (2025, August 11). In *Wikipedia*. https://pl.wikipedia.org/wiki/Rurka_Pitota
- [17] Guo, K. (2023). *Fluid pressure guide: Static pressure vs. dynamic pressure vs. total pressure*. Sino-inst. <https://sino-inst.com/fluid-pressure-static-pressure-vs-dynamic-pressure-vs-total-pressure>
- [18] Bargłowski, L., Adamski, M., Rebman, M. (2023). Analysis of structural solutions for radiators in buildings. *Civil and Environmental Engineering Reports*, 33(1), 139–149. <https://doi.org/10.59440/ceer-2023-0010>
- [19] Bargłowski, L., Adamski, M. (2024). Central heating control charts for the economic use of energy in residential buildings. *Civil and Environmental Engineering Reports*, 34(3/2024), 1–15.
- [20] Adamski, M., Bargłowski, L., Rebman, M. (2022). Normy PN-EN 834 dotyczące elektronicznych podzielników kosztów ogrzewania. *Ciepłownictwo, Ogrzewnictwo, Wentylacja*, 53(10), 36–38. <https://doi.org/10.15199/9.2022.10.6>

- [21] Reda, M. (2014). *Przenoszenie niepewności. Niepewności parametrów prostej. Test istotności*. https://kchf.ch.pw.edu.pl/files/instructions/lab_bledy.pdf
- [22] Szydłowski, H. (1999). *Pracownia fizyczna*. Wydawnictwo Naukowe PWN.
- [23] Patent PL195531 (B1). Układ do pomiaru ilości ciepła możliwego do pobrania w węźle cieplnym i sposób pomiaru tego ciepła. Twórca wynalazku: Mariusz Adamski, data pierwszeństwa: 07.03.2000.
- [24] Adamski, M. (2017). Pole temperatury powierzchni grzejnika a wskazania podzielnika kosztów. *Ciepłownictwo, Ogrzewnictwo, Wentylacja*, 48(10), 418–422. <https://doi.org/10.15199/9.2017.10.6>

Life Cycle Assessment (LCA) of glass/polyester laminates in laboratory-scale testing

Adriana Dowbysz¹, Mariola Samsonowicz¹, Bożena Kukfisz²

¹ *Department of Chemistry, Biology, and Biotechnology
Faculty of Civil Engineering and Environmental Sciences
Białystok University of Technology*

² *Institute of Safety Engineering
Fire University*

* *adriana.dowbysz@pb.edu.pl*

Abstract: Favorable properties make fiber-reinforced composites an alternative to conventionally used materials in various industry sectors. However, they may pose environmental risks, especially when petroleum-based resins are used as a matrix. Another important factor is the composite manufacturing method. This study aimed to analyze the environmental impact of glass/polyester laminates prepared via the hand lay-up (HL) and resin infusion (RI) methods through the Life Cycle Assessment (LCA), and to compare resulting impact indicators. The LCA was performed according to ISO 14044 and ISO 14040 standards and was based on laboratory-scale data. The results indicate that the RI method exhibits a greater negative environmental impact compared to the HL method, due to significantly increased electricity usage, despite the lower usage of unsaturated polyester resin.

Key words: life cycle assessment, glass/polyester laminates, hand lay-up, resin infusion

1. Introduction

Fiber-reinforced polymer composites, due to their strength, stiffness, and resistance to corrosion, find application in many industries, including aviation shipbuilding, and construction [1]. Most of them, e.g., glass/polyester laminates, are fully synthetic products, which are not biodegradable and may pose an environmental hazard [2]. However, not only does the use of raw materials define the overall impact of such polymers on the environment, but the manufacturing method also plays an important role.

The most common technology for composite production is lay-up, which includes, e.g., hand lay-up (HL), spray-up, vacuum, and pressurized vacuum bagging or resin infusion (RI) methods. They differ in the energy demand, consumption of disposable materials, and process conditions [3].

To fully understand a product or process’s environmental impact, a Life Cycle Assessment (LCA) is performed. It enables a comprehensive analysis of aspects related to the change or selection of a product or process [4]. Therefore, LCA is an extremely useful tool for verifying whether replacing metals or other materials with composites will have a less negative impact on the environment.

The aim of this study is to compare the environmental impact of glass/polyester laminates prepared via HL and RI methods and determination of crucial aspects regarding their production based on laboratory-scale data.

2. Materials and Methods

2.1. Materials

The detailed composition of glass/polyester laminates prepared via HL and RI methods is presented in Table 1.

Table 1. Composition of glass/polyester laminates prepared via the HL and RI methods

Ingredient [g]	HL	RI
UPR	632.81	600.00
Hardener	12.66	6.00
Fiberglass	316.41	

Source: own studies.

Unsaturated polyester resin (UPR) Polimal 1094 AWTP-1 (Sarzyna Chemical Sp. z o.o., Nowa Sarzyna, Poland) served as a matrix. It was cured using methyl ethyl ketone peroxide hardener (Luperox-K1, Arkema Sp. z o.o., Inowrocław, Poland) at a concentration of 1 wt. % of the UPR. The fiberglass chopped strand mat with a basis weight of 450 g·m⁻² (Krosglass, Krosno, Poland) was used as the reinforcement material.

2.2. Methods

The LCA was performed according to ISO 14040 [5] and ISO 14044 [6] standards. The calculations were made with the use of SimaPro v. 9.4 (PRé Sustainability B.V., Netherlands) based on the Ecoinvent v. 3.10 database. The study concerned partial LCA (“from cradle to gate”) and included production of raw materials, transport, and laminate preparation. The functional unit was a laminate plate with the dimensions of 60 cm x 20 cm. The impact categories and their indicators are presented in Table 2.

Table 2. Composition of glass/polyester laminates prepared via the HL and RI methods

Number	Impact category	Unit
1.	Climate change	kg CO ₂ eq.
2.	Ozone depletion	kg CFC11 eq.
3.	Ionising radiation	kBq U ²³⁵ eq.
4.	Photochemical ozone formation	kg NMVOC eq.
5.	Particulate matter	disease increase
6.	Human toxicity, non-cancer	CTU _h
7.	Human toxicity, cancer	CTU _h
8.	Acidification	mol H ⁺ eq.
9.	Eutrophication, freshwater	kg P eq.
10.	Eutrophication, marine	kg N eq.
11.	Eutrophication, terrestrial	mol N eq.
12.	Ecotoxicity, freshwater	CTU _e
13.	Land use	Pt
14.	Water use	m ³ deprivation
15.	Resource use, fossils	MJ
16.	Resource use, minerals and metals	kg Sb eq.

Source: own studies.

Determination of the set of inputs and outputs was based on experimental data conducted at the laboratory scale. The data for the laminate prepared via the contact method were used according to previous studies conducted by the authors [7]. To compare the environmental impact of the preparation method, the glass/polyester laminate with the same dimensions (plate of 60 cm x 20 cm) was prepared via the resin infusion method. Five sheets of fiberglass mats were cut and placed on the moulding plate. The peel ply and resin distribution media were placed between the fiberglass and the vacuum bag. After achieving the vacuum, the UPR mixed with the hardener was driven into the laminate and left to cure for 24 h. The progress of the resin infusion process over time, where 0 s stands for the start of the UPR mixture aspiration, is shown in Figure 1.

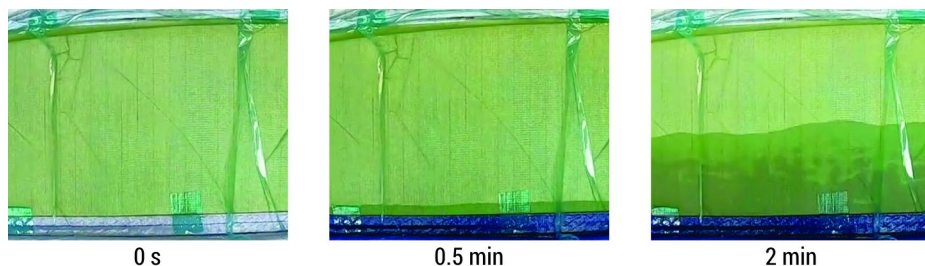


Figure 1. The progress of the resin infusion process over time
Source: own studies.

The process flow diagram for the laminate prepared via the RI method is presented in Figure 2.

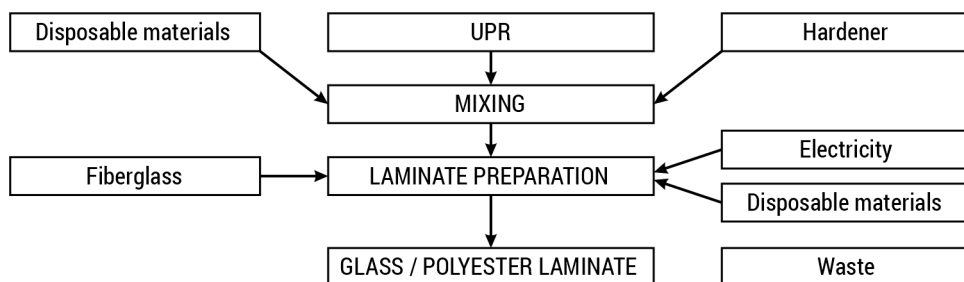


Figure 2. The process flow diagram for the preparation of glass/polyester laminate via the RI method
Source: own studies.

In comparison to the process flow diagram of laminate prepared via the HL method [1], it includes the energy for the vacuum pump and does not include the additional UPR mixture venting.

3. Results and discussion

The first step of an LCA concerned characterization, where elementary flows were translated into contributions to different impact categories by means of characterization factors [8].

The preparation of laminates via the RI method exhibits a greater negative environmental impact among all considered impact categories (Figure 3). The most significant increase (+ 580.82%) compared to laminate prepared via the HL method was observed in category 9 (freshwater eutrophication). However, only in categories 2 (ozone depletion) and 7 (particulate matter) the differences in environmental impact between the two processes are insignificant.

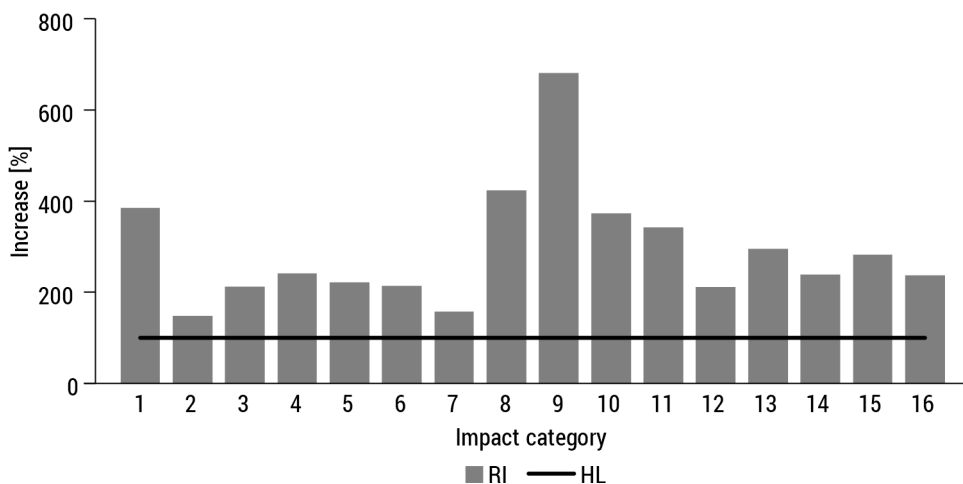


Figure 3. Increase in the environmental impact in all studied categories for the laminate prepared via the RI method compared to the HL method (100%)

Source: own studies.

Considering laminates produced by both methods, the highest impact was obtained for categories: freshwater ecotoxicity, resource use (fossil fuels), and land use, which is presented in Figure 4.

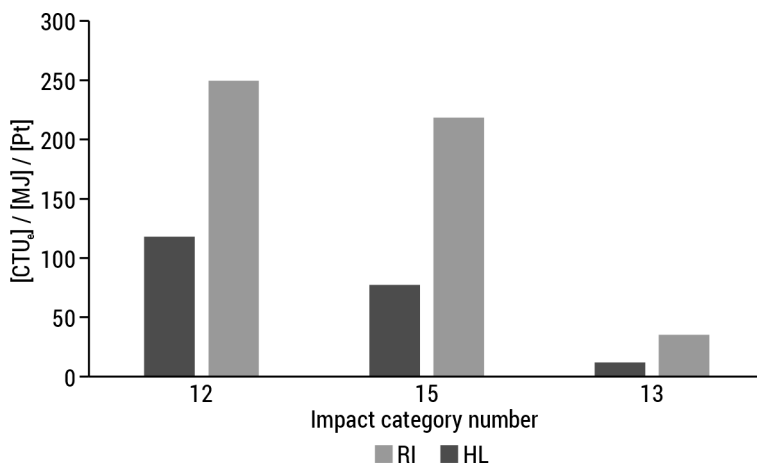


Figure 4. The impact of glass/polyester laminates preparation process via the hand lay-up and resin infusion methods in categories: ecotoxicity, freshwater (12), resource use, fossil fuels (15), and land use (13)

Source: own studies.

The greatest impact observed in category 12 (ecotoxicity, freshwater) for laminates prepared via both methods is expressed in Comparative Toxicity Units for ecotoxicity (CTU_e) [9]. Notably, the impact of the laminate prepared via the RI method (249.67 CTU_e) was more than twice that of the laminate produced using the HL method (117.89 CTU_e). The contribution of individual elements specified in the flow diagram is presented in Figures 5a and 5b.

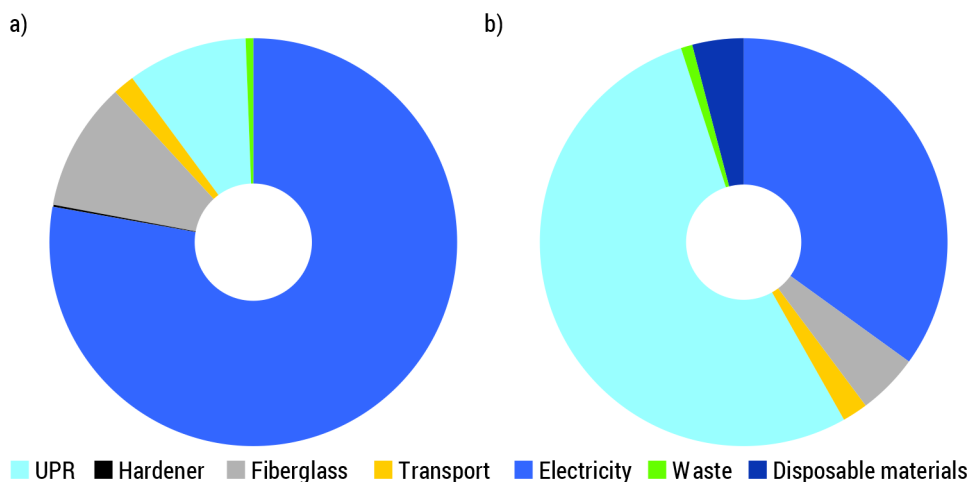


Figure 5. Contribution of individual components to the freshwater ecotoxicity impact category for the laminate: a) prepared via the HL method, b) prepared via the RI method

Source: own studies.

The largest percentage share (77.79%) in the freshwater ecotoxicity impact category for the laminate prepared via the HL method is attributed to UPR. In the case of the laminate produced by the RI method, its share is also significant (34.83%), but the highest was observed for electricity (53.34%). Disposable materials, which are not utilized in the HL method, account for 4.03% of the total contribution to this impact category for laminates prepared via the RI method.

The normalization stands for the division of the calculated impact by the impact of a reference value (normalization reference). It is the main factor of aggregation and has a significant impact on the LCA results [10].

The overall impact of laminate produced via the RI method (0.029) is over three times higher than that of laminate produced via the HL method (0.009). The contribution of specific elements to the overall impact of studied laminates is presented in Figures 6a and 6b.

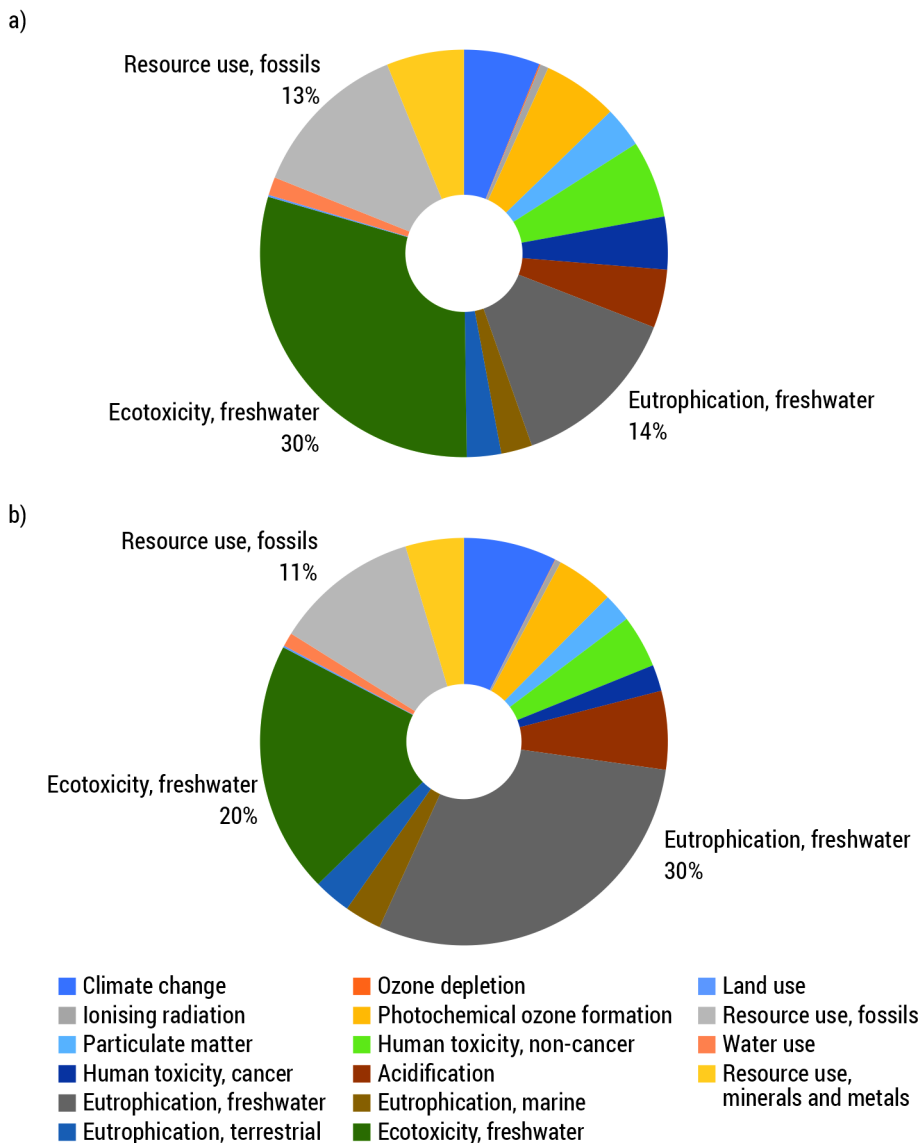


Figure 6. The contribution of impact categories to overall normalization results for laminate: a) prepared via the HL method, b) prepared via the RI method

Source: own studies.

In the context of total environmental impact, the most significant effects are observed in the following categories: freshwater ecotoxicity and eutrophication, as well as fossil fuel resource use. Based on Figures 7a and 7b, the elements that have the greatest influence on the obtained normalized values were identified.

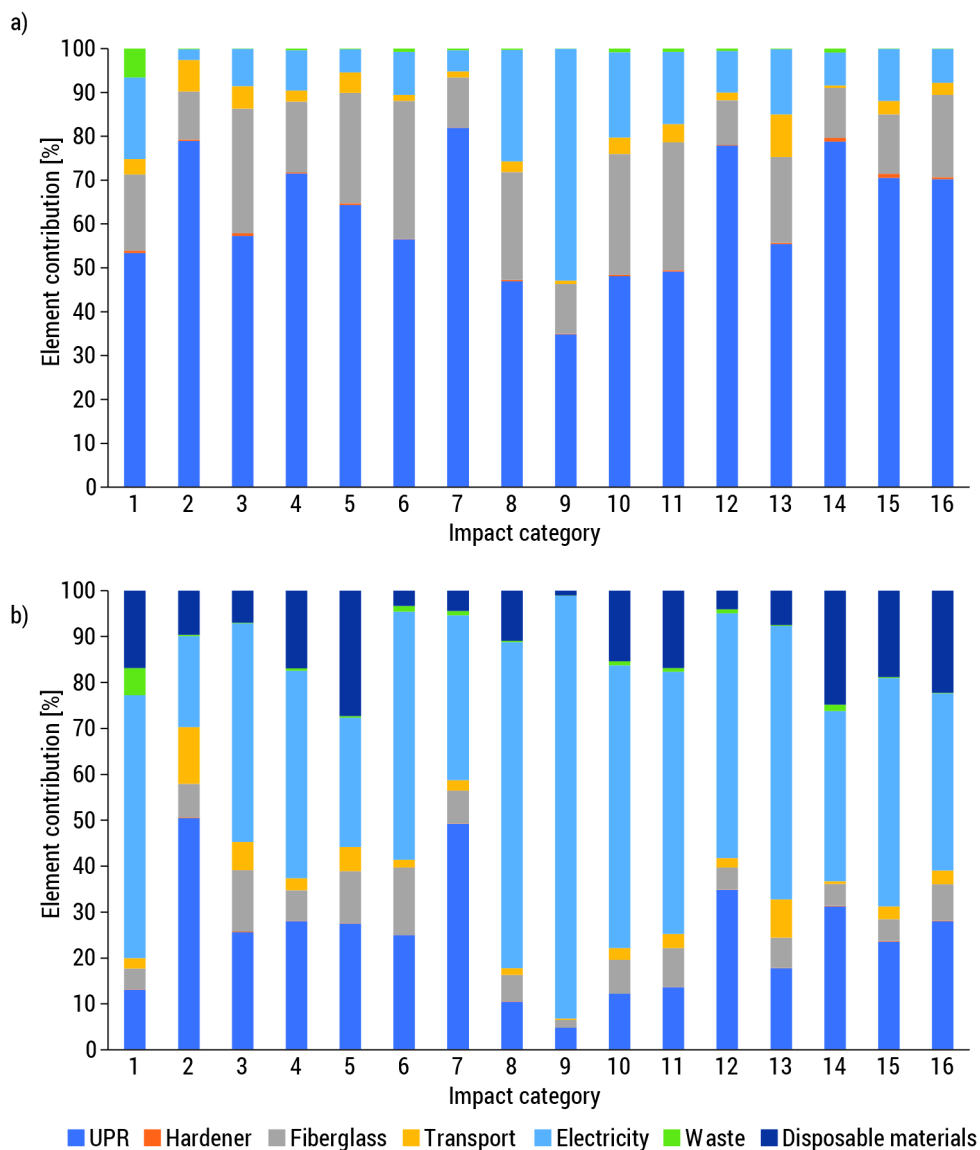


Figure 7. Contribution of elements to overall normalized impact for the laminate: a) prepared via the HL method, b) prepared via the RI method

Source: own studies.

In the case of the laminate prepared via the HL method, UPR accounts for the largest share among all impact categories (from 34.81 to 77.79%). A significant contribution of fiberglass is also observed (from 10.23 to 31.45%). For the laminate prepared by the RI method, the contribution of UPR to the overall environmental impact is considerably lower (from 4.85 to 50.48%). In this case, the leading

factor is electricity consumption, ranging from 19.77 to 92.08%. Additionally, disposable materials used in this method have a notable influence on the environmental impact (from 3.30 to 27.30%).

4. Conclusions

To compare the HL and RI laminate preparation processes, data from laboratory-scale experiments were used. Results of the LCA based on this type of data may differ from analyses conducted at larger scale. The difference arises from the optimization of industrial processes, including reduced energy demand, which generally lowers environmental impact.

Characterization results revealed that RI exhibits higher environmental impact across all studied categories, with the most significant increase observed in freshwater ecotoxicity. For the HL method, UPR primarily contributes to this effect, whereas in the RI method, the elevated impact stems from the substantial energy consumption.

Normalized results further indicate that the RI method has an approximately threefold higher environmental burden compared to the HL method. Although the reduced UPR usage in RI method lowers freshwater ecotoxicity, the HL method's significantly higher electricity usage contributes to over twice the impact on freshwater eutrophication.

These findings underscore the necessity of integrating renewable energy sources into the RI process to mitigate its overall environmental footprint. Additionally, a detailed analysis of single-use materials is critical. Replacing them with biodegradable alternatives or more environmentally friendly products could reduce the ecological load.

Funding

This study was funded by a research grant provided by the Ministry of Science and Higher Education (Poland), grant number WI/WB-IIŚ/10/2025.

Literature

- [1] Jubsilp, C., Mora, P., Bielawski, C. W., Lu, Z., Rimdusit, S. (2021). Thermosetting matrix based glass and carbon fiber composites. In K. Joseph, K. Oksman, G. George, R. Wilson, S. Appukuttan (Eds.), *Fiber reinforced composites* (pp. 341–403). Woodhead Publishing.
- [2] Dowbysz, A., Kukfisz, B., Samsonowicz, M., Markowska, D., Jankowski, P. (2023). Life cycle assessment of glass/polyester laminates used in the shipbuilding industry and its fire behavior. *Economics and Environment*, 85, 236–254. <https://doi.org/10.34659/eis.2023.85.2.529>
- [3] Lunetto, V., Galati, M., Settineri, L., Iuliano, L. (2023). Sustainability in the manufacturing of composite materials: A literature review and directions for future

- research. *Journal of Manufacturing Processes*, 85, 858–874. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2022.12.020>
- [4] Curran, M. A. (2013). Life cycle assessment: A review of the methodology and its application to sustainability. *Current Opinion in Chemical Engineering*, 2, 273–277. <https://doi.org/10.1016/j.coche.2013.02.002>
 - [5] ISO 14040:2006. Environmental Management – Life Cycle Assessment – Principles and Framework.
 - [6] ISO 14044:2006. Environmental Management – Life Cycle Assessment – Requirements and Guidelines.
 - [7] Dowbysz, A., Samsonowicz, M., Kukfisz, B., Pesta, J., Mózer, V., Wald, F. (2024). Ocena cyklu życia laminatów poliestrowo-szkłanych modyfikowanych wybranymi środkami uniepalniającymi. In D. Kołodyńska (Ed.), *Nauka i przemysł – lubelskie spotkania studenckie* (pp. 38–41). Maria Curie-Skłodowska University Press.
 - [8] van Oers, L., Guinée, J. B., Heijungs, R., Schulze, R., Alvarenga, R. A. F., Dewulf, J., Drielsma, J., Sanjuan-Delmás, D., Kampmann, T. C., Bark, G., Garcia Uriate, A., Menger, P., Lindblom, M., Alcon, L., Sevilla Ramos, M., Escobar Torres, J. M. (2020). Top-down characterization of resource use in LCA: From problem definition of resource use to operational characterization factors for dissipation of elements to the environment. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 25, 2255–2273. <https://doi.org/10.1007/s11367-020-01819-4>
 - [9] Erhart, S., Erhart, K. (2023). Environmental ranking of European industrial facilities by toxicity and global warming potentials. *Scientific Reports*, 13, 1772. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-25750-w>
 - [10] Hélias, A., Servien, R. (2021). Normalization in LCA: How to ensure consistency? *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 26, 1117–1122. <https://doi.org/10.1007/s11367-021-01897-y>

Impact of ultraviolet radiation on skin cell redox balance and phenolic-based photoprotection strategies

Ewelina Gołębiewska^{1*}, Monika Kalinowska¹, Marcin Zieliński², Marek Pruszyński^{2,3}

¹ Department of Chemistry, Biology and Biotechnology,
Faculty of Civil Engineering and Environmental Science, Białystok University of Technology

² NOMATEN Centre of Excellence, National Centre for Nuclear Research

³ Institute of Nuclear Chemistry and Technology

*e.golebiewska@pb.edu.pl

Abstract: Ultraviolet radiation (UVR; 100–400 nm) is classified as one of the major environmental stressors, significantly contributing to oxidative damage in skin cells by generating reactive oxygen species (ROS). Excessive production of ROS and insufficient antioxidant protection leads to photoaging, immunomodulation, melanogenesis, and ultimately photocarcinogenesis. A wide range of natural compounds and plant extracts have been proven to be beneficial in supporting effective skin protection against oxidative stress and UV damage. The increase in the incidence of skin diseases has led to considerable scientific interest in researching the development of new, natural and improved ingredients for photoprotective products. This short review focuses on the effects of UVR on the skin cell redox balance and contemporary sun protection concepts based on natural phenolic compounds.

Key words: reactive oxygen species, antioxidants, natural products, ultraviolet radiation, photodamage

1. Introduction

Human skin is directly exposed to UVR on a daily basis. At low doses, UVR is essential for the synthesis of vitamin D and the induction of β -endorphin expression, which improves well-being. However, prolonged or excessive exposure can lead to sunburn, inflammation, immune suppression, photoaging, and cancer. It is estimated that up to 80% of skin aging symptoms result from chronic UV exposure [1, 2]. In addition, more than two million cases of non-melanoma skin cancers are diagnosed globally each year, with UVR recognized as the primary environmental risk factor [3]. During exposure to UVR, ROS, such as superoxide anion radical ($\cdot\text{O}_2^-$), hydroxyl radical ($\cdot\text{OH}$), singlet oxygen ($^1\text{O}_2$), hydrogen peroxide (H_2O_2), as well as lipid peroxides, and their radicals (LOOH and LOO $\cdot$) are formed. An excess of ROS can lead to extensive damage to all important cellular components, including proteins, lipid membranes (*via* lipid peroxidation), and DNA fragmentation.

To combat oxidative stress, organisms have developed a three-level antioxidant defense system (Figure 1), which includes the following elements:

- endogenous antioxidant enzymes (e.g. superoxide dismutase (SOD), catalase, and glutathione peroxidase (Se-GSH-Px)) that neutralize ROS,
- exogenous dietary antioxidants (e.g. flavonoids, vitamin C, and E),
- and specific enzymes responsible for the elimination of oxidized biomolecules (e.g. lipases, proteases, DNA-repair enzymes).

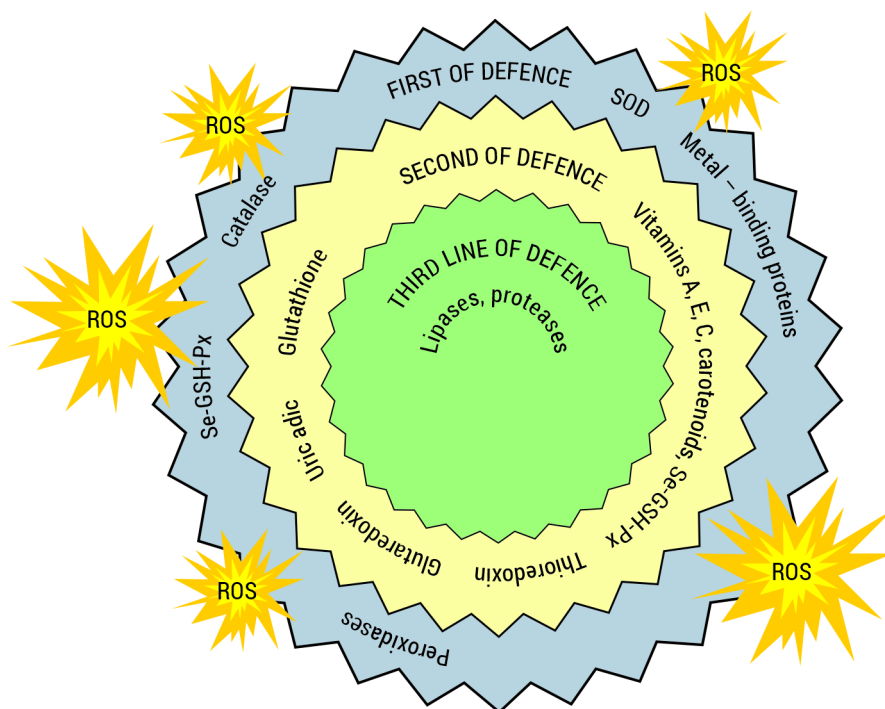


Figure 1. Three levels of cellular antioxidant protection

Source: own studies.

However, this natural defense is often insufficient during prolonged or intense UVR exposure. As a result, increasing the antioxidant capacity of the skin through the topical application of protective agents has emerged as an important defense strategy. In recent years, natural bioactive compounds – particularly plant-derived polyphenols – have gained attention for their potent antioxidant, anti-inflammatory and photoprotective properties. These compounds not only scavenge free radicals, but also modulate redox-sensitive signaling pathways and promote the structural integrity of the skin [4]. This review aims to discuss the mechanism by which UVR disrupts redox homeostasis in human skin cells and contributes to oxidative damage. It further provides an overview of both synthetic and natural UV-protective agents,

with particular emphasis on natural phenolic compounds as promising candidates in photoprotection strategies designed to alleviate photooxidative stress and prevent premature skin aging.

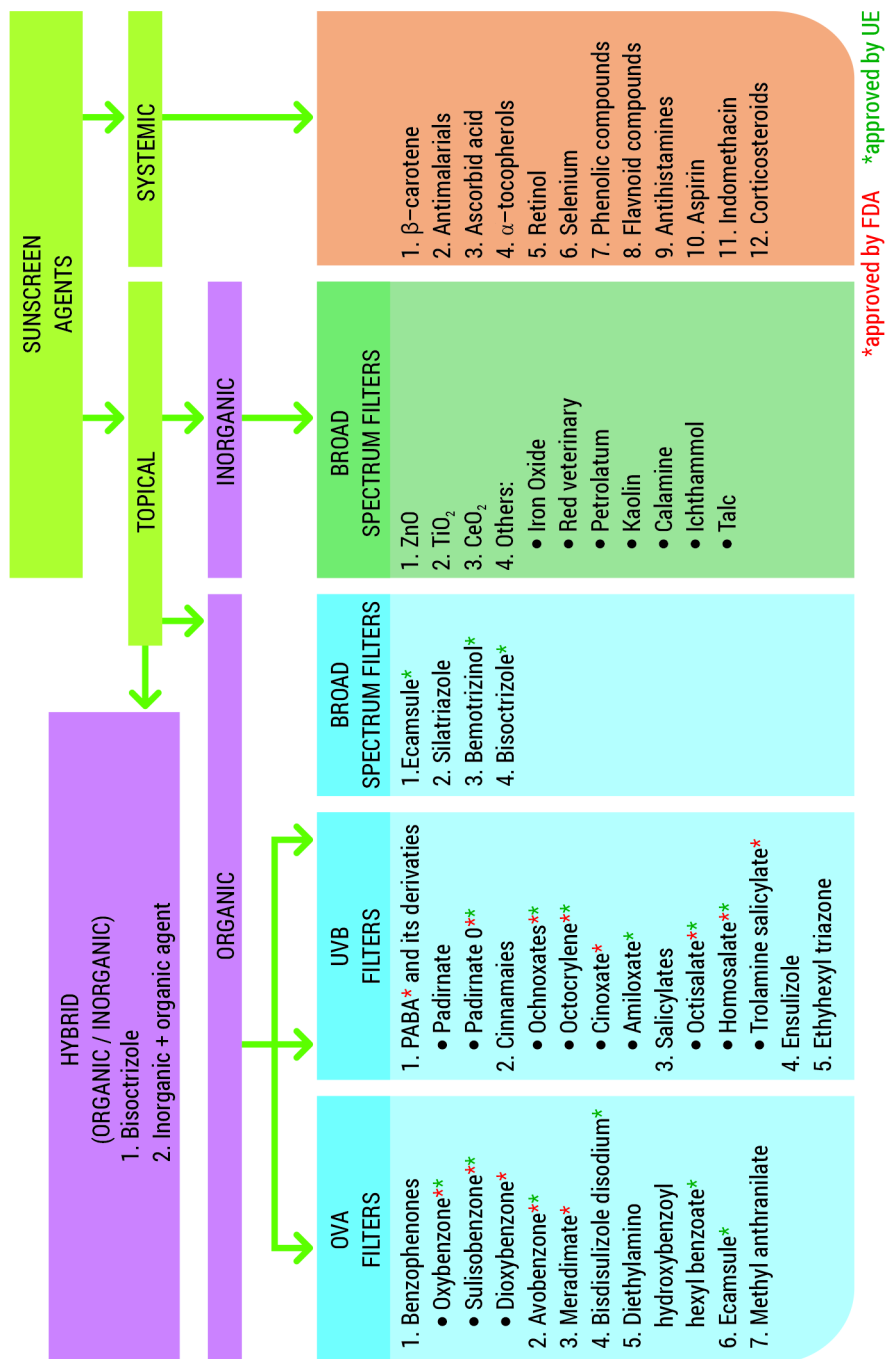
2. Mechanism of UV-induced oxidative stress

UVR is commonly divided into three categories based on wavelength: UVC (100–280 nm), UVB (280–320 nm), and UVA (320–400 nm). According to the inverse relationship between photon energy and wavelength, photons with shorter wavelengths possess higher energy. Consequently, among these types, UVC radiation is the most energetic and potentially the most harmful. However, it is almost completely absorbed by the ozone layer in the stratosphere. In contrast, about 90–99% of UVA radiation and about 1–10% of UVB radiation reach the Earth's surface. Therefore, only UVA and UVB radiation exert biological effects on human cells [5]. There are three main layers in the structure of the human skin: epidermis, dermis, and hypodermis. The primary cell type that build up the epidermis are keratinocytes, which are also the cell of origin for most non-melanoma skin cancers. The outermost layer – epidermis, is abundant in UVR absorbing molecules, known as chromophores. These chromophores include nucleic acids, urocanic acid, aromatic amino acids (components of proteins), melanin pigments, and their precursors and metabolites. During UVR exposure, chromophores absorb high-energy photons, leading to electron excitation and the formation of reactive photoproducts. UVA photons penetrate deeply into the skin, reaching the dermal layer, whereas the effects of UVB radiation is primarily confined on the basal layer of the epidermis. UVR contributes to the initiation of carcinogenesis through its ability to damage DNA and induce mutations in key regulatory genes, such as photo-oncogenes and tumor suppressor genes like p53. UVB rays directly interact with DNA, causing the formation of pyrimidine dimer and pyrimidine (6–4) pyrimidone products, which can result in DNA replication errors or apoptosis. In contrast, UVA rays induce DNA damage through an oxygen dependent mechanism, particularly *via* photosensitization reactions. These processes generate ROS and RNS (reactive nitrogen species) that can oxidatively modify DNA bases and nucleotides. One notable modification is 8-oxo-7,8-dihydroguanine (8-oxoGua), a highly mutagenic product associated with the conversion of G:C to T:A. Such mutations have been identified in oncogenes and tumor suppressor genes, including p53, and are considered critical events in cancer development. UVA radiation also contributes to the activation of matrix metalloproteinase-1 (MMP-1), an enzyme produced by skin cells that damages and degrades collagen [2, 6, 7].

3. Synthetic vs. natural UV protective ingredients

Traditionally used sunscreens only provide “passive photoprotection” by absorbing (organic filters), scattering or reflecting (inorganic filters) UVR. However, they do not have the ability to reverse cellular damage once it has occurred. Moreover, many commonly used sunscreen ingredients – both organic and inorganic (Figure 2) – are often non-biodegradable and may pose significant environmental risks, especially to aquatic ecosystems and the organisms that inhabit them (e.g. corals, algae, fish, dolphins) [8]. Among inorganic ingredients, only TiO_2 and ZnO have been approved by the U.S. Food and Drug Administration (FDA) and the European Union as safe and effective for UV protection [9]. Nonetheless, concerns have been raised about the safety of inorganic ingredients in micro- or nano-sized forms, as they may penetrate biological barriers. For instance, Pan et al. revealed that TiO_2 nanoparticles (15 ± 3.5 nm) are able to pass through the cell membranes and exert toxic effects on human dermal fibroblasts [10]. It has also been shown that TiO_2 can initiate the synthesis of ROS after photoactivation [11]. Moreover, some sunscreen components, such as PABA (4-aminobenzoic acid) and oxybenzone, exhibit limited photostability and have been identified as potential photoallergic agents, capable of triggering adverse skin reactions upon exposure to UVR [12]. Therefore, there is still a significant need to discover new, non-toxic, more photostable, safer ingredients with good skin biocompatibility for photoprotective formulations.

In recent years, increasing attention of researches have been directed toward natural bioactive compounds, due to their potential to prevent the formation of ROS and to scavenge existing free radicals (Table 1). Many phenolic compounds are capable of absorbing UVA and UVB radiation within the wavelength range of 200–400 nm [13]. These properties depend on chemical structure, including the presence and number of aromatic rings, cyclic or conjugated double bonds, and the type of substituents. Polyphenols, in particular, exhibit strong absorption, specifically within the ranges of 304–350 nm and 352–385 nm. Phenolic compounds, such as ferulic and caffeic acids can absorb radiation in the UVB range. Flavonoids demonstrate significant UV absorption in 240–285 nm and 300–550 nm ranges. The most common classes of flavonoids include flavones and flavonols, which absorb UV in the 280–350 nm range. Flavanones such as diosmetin, extend their absorption to the 280–560 nm range, while isoflavones absorb UV mainly in the 236–262 nm range. In addition, anthocyanidins absorb UV within the visible light range, typically between 465–560 nm [9, 14].



*approved by FDA *approved by UE

Figure 2. Sunscreen ingredients classification
Source: [12] and own studies.

Table 1. Recent research on natural origin compounds in sunscreen formulations

Natural compound	Absorption peaks [nm]	Chemical/Physical UV filter	Results	Ref.
Ferulic acid	284, 307	Ethylhexyl triazone, bis-ethylhexyloxyphenol methoxyphenyl triazine	Increased <i>in vivo</i> SPF by 37% and UVA-PF by 26%	[15]
Rutin	260, 360	Butyl methoxydibenzoylmethane, octyl dimethyl PABA	Increased <i>in vivo</i> SPF by 70%	[16]
Luteolin	268, 284, 333	–	Inhibited UVB-induced decrease in cell viability	[17]
Resveratrol	310	–	Provided satisfactory <i>in vitro</i> UV protection	[18]
Quercetin	258, 375	–	Blocked UVB-induced COX-2 over-expression and NF- κ B activation in the HaCat cells	[19]
Apigenin	270, 340	–	Increased <i>in vivo</i> UVA and UVB protection by 50% in human keratinocytes	[20]
Naringenin	285	Methyl paraben, ZnO, TiO ₂ and its nanoparticles	Optimized cream showed the highest SPF value and increased skin retention of naringenin	[21]
Morin	264, 351	Nano ZnO and TiO ₂ , avobenzone	Optimized cream exhibited high SPF value and enhanced photoprotective effect	[22]
Silymarin	285, 325	–	Reduced UVA-stimulated ROS generation, DNA strand breaks, GSH depletion, and MMP-1 levels; increased HO-1, and reduced HSP70 levels	[23]

Source: own studies.

Table 1 presents data from the recent research on the use of natural compounds in sunscreen formulations. For example, in a study by Peres et al., the incorporation of ferulic acid into a sunscreen containing ethylhexyl triazone and bis-ethylhexyloxyphenol methoxyphenyl triazine demonstrated a synergistic effect. As a result, the sun protection factor (SPF) of the formulation increased by 37%, and the UVA protection factor (UVA-PF) increased by 26% in *in vivo* tests [15]. In another study, luteolin was found to reduce ROS levels, decrease the activation of matrix metalloproteinases (MMPs), and enhance collagen expression in rat skin. Luteolin has also been shown to protect skin cells against UVB radiation through the SIRT3/ROS/mitogen-activated protein kinase (MAPK) pathway [17]. The *in vitro* SPF value of an emulgel sunscreen formulation containing 10% resveratrol and 10%

green extract was 16.9, which according to FDA guidelines, is considered a satisfactory result for photoprotective purposes. Moreover, both resveratrol and extract demonstrated strong DPPH• radical scavenging activity [18]. Similarly, silymarin has shown promising photoprotective effects, including a reduction in UVA-stimulated ROS generation and prevention of single-strand DNA breaks. It also mitigates glutathione (GSH) depletion, decreases the activation of caspase-3, and reduces the protein levels of MMP-1. Furthermore, silymarin moderately increases the expression of heme oxygenase-1 (HO-1) and reduces heat shock protein 70 (HSP70) levels [23].

4. Conclusions

Exposure to UVR has both beneficial (stimulation of vitamin D synthesis, induction of β -endorphin expression) and harmful (photoaging, increased risk of skin cancer) effects on human health. While there are many synthetic sunscreens available, many of these formulations have some drawbacks, in particular their tendency to create photoreactive byproducts that can potentially damage human skin and have toxic effects on the environment. In the European Union, about 30 UV filters meet the requirements and can be used in sunscreen products [7]. The incorporation of natural compounds into sunscreen formulas can provide protection through various mechanisms, such as enhancing immune function, suppressing specific genes or preventing oxidative DNA damage. Among these, natural flavonoids stand out for their ability to absorb UVR, their antioxidant activity and their positive effects on various cell signaling pathways. Nevertheless, any newly developed compound or ingredient must undergo rigorous evaluation – ensure its photostability and safety in terms of toxicity against humans and ecosystem. As outlined in this review, the incorporation of natural compounds and plant extracts into sunscreen formulas may allow the use of potentially harmful synthetic substances to be reduced while maintaining or even increasing the level of UV protection. This approach supports the development of safer and more environmentally friendly commercial sunscreens.

Funding

The project was financed in the framework of the Bialystok University of Technology program "Projekt PhD" (No: WI/WB-IIŚ/8/2024).

Literature

- [1] Narbutt, J., Philipsen, P. A., Harrison, G. I., Morgan, K. A., Lawrence, K. P., Baczyńska, K. A., Gryś, K., Rogowski-Tylman, M., Olejniczak-Staruch, I., Tewari, A., Bell, M., O'Connor, C., Wulf, H. C., Lesiak, A., Young, A. R. (2019). Sunscreen applied at ≥ 2 mg cm⁻² during a sunny holiday prevents erythema, a biomarker of ultraviolet radiation-induced DNA damage and suppression of acquired immunity. *British Journal of Dermatology*, 180(3), 604–614.

- [2] Milutinov, J., Pavlović, N., Ćirin, D., Atanacković Krstonošić, M., Krstonošić, V. (2024). The potential of natural compounds in UV protection products. *Molecules*, 29(22), 5409.
- [3] IARC Monograph. (2012). Radiation. *Journal of Materials Processing Technology*, 100.
- [4] Jomova, K., Alomar, S. Y., Alwasel, S. H., Nepovimova, E., Kuca, K., Valko, M. (2024). Several lines of antioxidant defense against oxidative stress: antioxidant enzymes, nanomaterials with multiple enzyme-mimicking activities, and low-molecular-weight antioxidants. *Archives of Toxicology*, 98(5), 1323–1367.
- [5] Gromkowska-Kępa, K. J., Puścion-Jakubik, A., Markiewicz-Żukowska, R., Socha, K. (2021). The impact of ultraviolet radiation on skin photoaging – Review of *in vitro* studies. *Journal of Cosmetic Dermatology*, 20(11), 3427–3431.
- [6] Lucas, R. M., Norval, M., Neale, R. E., Young, A. R., de Gruijl, F. R., Takizawa, Y., van der Leun, J. C. (2015). The consequences for human health of stratospheric ozone depletion in association with other environmental factors. *Photochemical & Photobiological Sciences*, 14(1), 53–87.
- [7] Jesus, A., Sousa, E., Cruz, M. T., Cidade, H., Lobo, J. M. S., Almeida, I. F. (2022). UV filters: Challenges and prospects. *Pharmaceuticals*, 15(3), 263.
- [8] Tosato, M. G., Orallo, D. E., Fangio, M. F., Diz, V., Dicelio, L. E., Churio, M. S. (2016). Nanomaterials and natural products for UV-photoprotection. *Surface Chemistry of Nanobiomaterials*, 3, 359–383.
- [9] Milutinov, J., Pavlović, N., Ćirin, D., Atanacković Krstonošić, M., Krstonošić, V. (2024). The potential of natural compounds in UV protection products. *Molecules*, 29(22), 5409.
- [10] Pan, Z., Lee, W., Slutsky, L., Clark, R. A., Permodet, N., Rafailovich, M. H. (2009). Adverse effects of titanium dioxide nanoparticles on human dermal fibroblasts and how to protect cells. *Small*, 5, 511–520.
- [11] Dréno, B., Alexis, A., Chuberre, B., Marinovich, M. (2019). Safety of titanium dioxide nanoparticles in cosmetics. *Journal of the European Academy of Dermatology and Venereology*, 33, 34–46.
- [12] Ngoc, L. T. N., Tran, V. V., Moon, J. Y., Chae, M., Park, D., Lee, Y. C. (2019). Recent trends of sunscreen cosmetic: An update review. *Cosmetics*, 6(4), 64.
- [13] Ghazi, S. (2022). Do the polyphenolic compounds from natural products can protect the skin from ultraviolet rays? *Results in Chemistry*, 4, 100428.
- [14] Morocho-Jácome, A. L., Freire, T. B., de Oliveira, A. C., de Almeida, T. S., Rosado, C., Velasco, M. V. R., Baby, A. R. (2021). *In vivo* SPF from multifunctional sunscreen systems developed with natural compounds – A review. *Journal of Cosmetic Dermatology*, 20(3), 729–737.
- [15] Peres, D. A., Sarruf, F. D., de Oliveira, C. A., Velasco, M. V. R., Baby, A. R. (2018). Ferulic acid photoprotective properties in association with UV filters: Multifunctional sunscreen with improved SPF and UVA-PF. *Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology*, 185, 46–49.

- [16] Tomazelli, L. C., de Assis Ramos, M. M., Sauce, R., Cândido, T. M., Sarruf, F. D., de Oliveira Pinto, C. A. S., de Oliveira, C. A., Rosado, C., Velasco, M. V. R., Baby, A. R. (2018). SPF enhancement provided by rutin in a multifunctional sunscreen. *International Journal of Pharmaceutics*, 552, 401–406.
- [17] Mu, J., Ma, H., Chen, H., Zhang, X., Ye, M. (2021). Luteolin prevents UVB-induced skin photoaging damage by modulating SIRT3/ROS/MAPK signaling: An *in vitro* and *in vivo* studies. *Frontiers in Pharmacology*, 12, 728261.
- [18] Bhattacharya, S., Sherje, A. P. (2020). Development of resveratrol and green tea sunscreen formulation for combined photoprotective and antioxidant properties. *Journal of Drug Delivery Science and Technology*, 60, 102000.
- [19] Zhu, X., Zeng, X., Zhang, X., Cao, W., Wang, Y., Chen, H., Wang, T., Tsai, H. I., Zhang, R., Chang, D., He, S., Mei, L., Shi, X. (2016). The effects of quercetin-loaded PLGA-TPGS nanoparticles on ultraviolet B-induced skin damages *in vivo*. *Nanomedicine*, 12(3), 623–632.
- [20] Sánchez-Marzo, N., Pérez-Sánchez, A., Ruiz-Torres, V., Martínez-Tébar, A., Castillo, J., Herranz-López, M., Barrajón-Catalán, E. (2019). Antioxidant and photoprotective activity of apigenin and its potassium salt derivative in human keratinocytes and absorption in caco-2 cell monolayers. *International Journal of Molecular Sciences*, 20(9), 2148.
- [21] Joshi, H., Hegde, A. R., Shetty, P. K., Gollavilli, H., Managuli, R. S., Kalthur, G., Mutalik, S. (2018). Sunscreen creams containing naringenin nanoparticles: Formulation development and *in vitro* and *in vivo* evaluations. *Photodermatology, Photoimmunology & Photomedicine*, 34(1), 69–81.
- [22] Shetty, P. K., Venuvanka, V., Jagani, H. V., Chethan, G. H., Ligade, V. S., Musmade, P. B., Nayak, U. Y., Reddy, M. S., Kalthur, G., Udupa, N., Rao, C. M., Mutalik, S. (2015). Development and evaluation of sunscreen creams containing morin-encapsulated nanoparticles for enhanced UV radiation protection and antioxidant activity. *International Journal of Nanomedicine*, 10, 6477–6491.
- [23] Rajnochová Svobodová, A., Gabrielová, E., Michaelides, L., Kosina, P., Ryšavá, A., Ulrichová, J., Zálešák, B., Vostálová, J. (2018). UVA-photoprotective potential of silymarin and silybin. *Archives of Dermatological Research*, 310, 413–424.

Związki fenolowe i ich zastosowanie w przemyśle

Maciej Kozłowski, Monika Kalinowska

Katedra Chemii, Biologii i Biotechnologii

Wydział Budownictwa i Nauk o Środowisku

Politechnika Białostocka

maciej.kozlowski@sd.pb.edu.pl

Abstract: Phenolic compounds are a diverse group of bioactive molecules widely distributed in plants, known for their strong antioxidant, antimicrobial, and anti-inflammatory properties. These characteristics have generated significant interest in their use across various industries, representing promising, sustainable alternatives to synthetic chemicals, in line with green chemistry and circular economy trends. This review outlines the key features of phenolic compounds and explores their applications in food and packaging, cosmetics, textiles, and construction.

Key words: phenolic acids, antioxidants, phenolic compounds

1. Wstęp

Wolne rodniki (ang. *reactive oxygen species* – ROS) to atomy, cząsteczki lub jony posiadające jeden niesparowany elektron, co sprawia, że, dążąc do jego sparowania, są bardzo reaktywne i utleniające. Wolne rodniki mogą uszkadzać białka, lipidy i DNA, co może prowadzić do pojawienia się nowotworów, chorób sercowo-naczyniowych oraz przyspieszenia procesów starzenia się organizmów [1]. Ponadto produkcja wolnych rodników jest związana nie tylko z fizjologicznymi procesami metabolicznymi w organizmie ludzkim (źródła endogenne), ale także z czynnikami środowiskowymi, takimi jak stres, promieniowanie UV, zanieczyszczenie, pestycydy i chemikalia przemysłowe. Zjawisko, kiedy produkcja ROS przewyższa ich usuwanie przez systemy biologiczne (mechanizmy obronne antyoksydantów), nazywana jest stresem oksydacyjnym.

Naturalne antyoksydanty pochodzące z roślin można podzielić na trzy główne klasy: związki fenolowe, witaminy i karotenoidy. Związki fenolowe są wtórnymi metabolitami występującymi w roślinach. Odpowiadają one głównie za ochronę przed promieniowaniem UV i przed zakażeniami wywołanymi patogenami. Do polifenoli zalicza się wiele różnych związków: od prostych flawonoidów i kwasów fenolowych, przez flawonoidy złożone, aż po barwne antocyjany [2]. Dodatkowo metabolity fenolowe odgrywają istotną rolę w innych procesach, na przykład w wytwarzaniu substancji przyciągających zapylaczy, barwieniu w celu kamuflażu oraz obrony przed zjedzeniem, jak również wspomagają działanie antybakteryjne i przeciwrzybicze. Polifenole zawierają pierścienie benzenowe z jednym lub więcej podstawnikami hy-

droksylowymi i są obecne w wielu produktach spożywczych, takich jak owoce, warzywa, zboża i napoje [3, 4]. Występują również w produktach przetworzonych, takich jak czerwone wino, herbata czy kawa. Oprócz owoców znajdują się także w zbożach, suszonych roślinach strączkowych i czekoladzie [5].

Bioaktywność związków fenolowych często łączona jest z ich zdolnościami antyoksydacyjnymi. Aktywność przeciwutleniająca związków fenolowych dotyczy różnorodnych mechanizmów ich działania. Związki te mają m.in. właściwości redukujące, mogą oddawać elektron lub atom wodoru, a także wiążą wolne rodniki, które stabilizują lub delokalizują niesparowany elektron [3, 6]. Ponadto działają jako czynniki chelatujące jony metali enzymów katalizujących reakcje utleniania, a także jako inhibitory oksydaz [7]. Mogą również pełnić funkcję terminatorów przerywających łańcuchowe reakcje rodnikowe oraz stabilizatorów wolnych rodników, powstających w reakcjach oksydacyjnych, poprzez ich uwodornianie lub kompleksowanie [6]. Dzięki tym właściwościom związki fenolowe są coraz częściej wykorzystywane w przemyśle.

Celem niniejszej pracy jest przedstawienie aktualnego stanu wiedzy na temat właściwości biologicznych i funkcjonalnych związków fenolowych, które umożliwiają ich zastosowanie w różnych gałęziach przemysłu, w kontekście zrównoważonego rozwoju i zielonej chemii.

2. Zastosowania związków fenolowych w przemyśle spożywczym

Związki fenolowe odgrywają kluczową rolę zarówno w życiu roślin, jak i w jakości produkowanej żywności, wpływając na smak, barwę, wartości odżywcze oraz wykazując właściwości przeciwutleniające [8]. Dzięki temu są najczęściej wykorzystywaną klasą przeciwutleniaczy w przemyśle spożywczym. Wiele produktów utleniania jest odpowiedzialnych za jełczenie, obniżanie wartości odżywczej produktów i zwiększanie związanego z ich spożyciem ryzyka dla zdrowia z powodu akumulacji toksycznych związków. Wprowadzenie związków fenolowych może zmniejszyć lub zminimalizować powstawanie toksyn chemicznych, zwiększając tym samym wartość odżywczą i korzyści zdrowotne tych produktów, a także poprawiając ich trwałość.

Ekstrakty roślinne są bogate w związki fenolowe, takie jak werbaskozyd, kawowy, chlorogenowy, ferulowy, p-kumarynowy, p-hydroksybenzoesowy i syringowy, które są pozyskiwane m.in. z goździków, mięty, cynamonu, liczi i oliwek, a przyczyniają się do wydłużenia trwałości mięsa, nie wpływając jednocześnie negatywnie na jego walory smakowe. Stanowią więc zdrowszą alternatywę dla sztucznych konserwantów. Przykładowo, w jednym z badań oceniono zastosowanie ekstraktu z owoców liczi jako naturalnego przeciwutleniacza w nuggetsach z mięsa owczego. Ekstrakt z owocu nie wpływał na pH, proces gotowania ani cechy sensoryczne nuggetsów. Wykazano również, że ekstrakt bogaty w związki fenolowe opóźnił utlenianie lipidów podczas przechowywania mięsa

[9]. Z kolei zastosowanie układu enzymu laktazy i kwasu chlorogenowego do produkcji twarogów zaowocowało zwiększeniem potencjału przeciwtleniającego i uzyskaniem końcowego produktu o zwiększonej wartości odżywczej oraz lepszej wydajności w procesie powstawania skrzepu [10]. W innym badaniu udało się natomiast przyłączyć kwercetynę do skrobi, co zwiększyło jej wytrzymałość i wzmocniło zdolności przeciwtleniające. Tak przygotowany koniugat może być używany jako materiał opakowaniowy i środek do enkapsulacji [11]. W jeszcze innej analizie sprawdzono wpływ wodnych ekstraktów z kopru włoskiego i rumianku dodanych do ciastek. Wykazywały one zwiększoną aktywność przeciwtleniającą, nie powodując przy tym zmian w wyglądzie czy właściwościach odżywczych badanych wypieków [12].

Dodatkowo związki fenolowe stosowane są w produkcji aktywnych barier ochronnych, które aplikuje się na powierzchnię produktów spożywczych jako jadalne powłoki lub w postaci folii do pakowania żywności. Powłoki tego typu mogą być stosowane jako nośniki związków bioaktywnych, w tym o właściwościach przeciwtleniających i przeciwdrobnoustrojowych. Przykładami mogą być stworzenie jadalnej powłoki z gumy arabskiej z ekstraktem z tulsii, bogatym w polifenole i flawonoidy, które okazały się skuteczne w opóźnianiu procesu dojrzewania owoców guawy i zapobiegają rozwojowi pleśni [13], a także folia wyprodukowana z ekstraktu etanolowego z liści mango, charakteryzująca się silnymi właściwościami przeciwtleniającymi, w której głównym składnikiem aktywnym był kwas galusowy [14]. Opakowania stworzone ze skrobi, pektyny cytrusowej i odpadów z *Acca sellowiana* (bogatych w związki fenolowe) wykazały z kolei aktywność przeciwdrobnoustrojową wobec *Escherichia coli*, *Salmonella Typhimurium* i *Pseudomonas aeruginosa*. Dodatkowo powstałe opakowanie było skuteczne w utrzymywaniu wysokiej jakości jabłek, zapobiegając utracie masy przez owoce do piątego dnia przechowywania [15]. Bioaktywne opakowania wyróżniają się ekologicznym charakterem, co czyni je istotnym krokiem naprzód dla branży spożywczej, oferując alternatywę dla plastikowych opakowań wytwarzanych z ropy naftowej. Związki fenolowe mogą być dodawane do opakowań w celu nadania im nowych właściwości. Przykładem może być tutaj film z dodatkiem antocyjanów pochodzących z morwy, służący do oceny świeżości ryb. Film ten zmienia kolor opakowania z fioletowego (dla świeżych ryb) na brązowy, a ostatecznie, po 24 godzinach, na ciemnozielony. Wynika to ze zdolności antocyjanów do zmiany barwy pod wpływem zmian pH [16].

3. Zastosowanie związków fenolowych w przemyśle tekstylnym

Owoce, warzywa i ich przemysłowe odpady są produktami bogatymi w związki fenolowe, które mają dużą wartość, generują stosunkowo niskie koszty związane z ich wytworzeniem i posiadają potencjał do wykorzystania jako naturalne barwniki.

Antocyjany są stosowane jako barwniki do żywności, ale mogą służyć także do barwienia innych produktów, takich jak bawełna, skóra, jedwab czy ludzkie włosy [17]. Polifenole mogą być również wykorzystywane w produkcji odzieży funkcjonalnej. Przykładowo, w jednym z badań zabarwiono jedwabną tkaninę ekstraktem z kory dębu. Charakteryzowała się ona wysoką trwałością, właściwościami ochronnymi przeciw promieniowaniu UV oraz aktywnością przeciwdrobnoustrojową, nawet po 50 kolejnych praniach [18, 19]. Wykazano również, że impregnacja włókien bawełny za pomocą ekstraktu polifenoli z liści mango nadaje właściwości antyoksydacyjne i przeciwbakteryjne tkaninie [20]. Ponadto wytworzono włókna juty, do których za pomocą peroksydazy chrzanowej przyłączono estry kwasu galusowego. W ten sposób uzyskano włókna o zwiększonej hydrofobowości [19]. Polifenole mogą być stosowane również jako naturalne środki garbujące. Przykładem tego jest wykorzystanie ekstraktów z kory *Cassia singueana*. Uzyskana tak garbowana skóra wykazywała porównywalne właściwości fizykochemiczne do skóry garbowanej tradycyjną taniną [21]. Ponadto opracowano metodę garbowania łączonego, opartą na syntanie na bazie triazyny i roślinnych polifenoli. Skóra otrzymana tą metodą wykazywała wysoką temperaturę kurczenia, która nie zmieniała się znacząco nawet po praniu w wodzie, roztworze mocznika i n-propanolu [22].

W celu zmniejszenia ryzyka pożaru przy produkcji tekstyliów stosowana jest obróbka ogniochronna, ponieważ są one dość łatwopalne i łatwo się spalają. Najczęściej używane związki ogniochronne zawierają brom, chlor, fosfor i azot, jednak niektóre z nich są toksyczne lub nieprzyjemne dla środowiska [23]. Badania wykazują, że zastosowanie ekstraktów bogatych w związki fenolowe również może nadać tkaninom właściwości ognioodporne. Przykładami mogą być tutaj: barwnik uzyskany z bulw *D. cirrhosa* użyty na tkaninie jedwabnej (LOI, czyli *limiting oxygen index* – powyżej 28%) [23], ekstrakt z odpadów łodyg herbaty (LOI – 25,6%) [24] czy ekstrakt ze słomy ryżowej (LOI – 27,5). Tkaniny mające wartości LOI powyżej 25% uznaje się za ogniochronne [25].

4. Zastosowania związków fenolowych w przemyśle kosmetycznym

Zastosowanie związków fenolowych w branży kosmetycznej i dermatologicznej wiąże się głównie z ich działaniem przeciwutleniającym. Polifenole wykazują różnorodne działanie na skórę zarówno w badaniach *in vitro*, jak i *in vivo*. Przeciwutleniacze stosuje się również w celu zapobiegania lub ograniczania oksydacyjnego rozkładu składników aktywnych kosmetyku oraz utleniania oleistych składników obecnych w formulacji [26].

Głównym czynnikiem przyczyniającym się do przedwczesnego starzenia, powstawania nowotworów i obniżenia odporności jest stres oksydacyjny. Udowodniono, że stosowanie naturalnych polifenoli roślinnych, takich jak EGCG (galusan

epigallokatechiny), skutecznie obniża poziom reaktywnych form tlenu (ROS) w skórze i wspiera naturalną ochronę antyoksydacyjną. Polifenole hamują peroksydację lipidów, zmniejszają poziom tlenu azotu i nadtlenu wodoru indukowanych przez UV oraz działają jako silne przeciwutleniacze. Wpływają na enzymy i receptory regulujące procesy komórkowe, a także bezpośrednio neutralizują wolne rodniki [27]. Promieniowanie UV jest natomiast jednym z czynników uszkadzających skórę. Ekstrakty bogate w polifenole łagodzą jego skutki u myszy i ludzkich fibroblastów, a kwas kawowy zmniejsza zapalenie i zmiany pigmentacyjne po ekspozycji na UV [28]. Z badań wynika, że związki fenolowe wykazują absorpcję promieniowania UV, z współczynnikiem ochrony przeciwsłonecznej (SPF) mieszczącym się w zakresie 7–29, co oznacza, że mogą stanowić umiarkowaną ochronę przeciw promieniowaniu UV [29]. Związki fenolowe często występują jako składniki aktywne w kosmetykach przeciw starzeniu się skóry. Potwierdzono, że kwercetyna, kwas galusowy i kwas ferulowy powodują inhibicję działania kolagenazy i elastazy, czyli enzymów odpowiedzialnych za powstawanie zmarszczek [30].

5. Zastosowanie związków fenolowych w przemyśle budowlanym

Istotnym elementem ochrony konstrukcji budowlanych jest stosowanie odpowiednich środków zabezpieczających. Ze względu na toksyczność wielu powszechnie używanych substancji, coraz większą uwagę poświęca się związkom pochodzenia naturalnego. Przykładem jest kwas galusowy, który może pełnić funkcję nietoksycznego inhibitora korozji stali. Zastosowanie kompleksu kwasu galusowego z jonami żelaza na powierzchni stali pozwala ograniczyć korozję aż o 31% [31]. Do innych naturalnych inhibitorów należą m.in. kwas karnozynowy, kwas rozmarynowy oraz karnozol [32].

Bitum to substancja stosowana do łączenia kruszyw mineralnych w mieszankach asfaltowych. W celu poprawy właściwości użytkowych i wydłużenia jego żywotności w budownictwie stosowane są modyfikatory asfaltu. Jednym z takich dodatków może być lignina, która odgrywa rolę modyfikatora oraz ekologicznej alternatywy dla tradycyjnego lepiszcza asfaltowego. Jej zastosowanie poprawia właściwości asfaltu zarówno w wysokich, jak i niskich temperaturach, a także zwiększa jego odporność na powstawanie kolein i pęknięć [33]. Biooleje bogate w związki fenolowe, dodane do asfaltu, zwiększają natomiast jego odporność na promieniowanie UV i ograniczają proces starzenia, a ponadto skutecznie regenerują i przywracają właściwości starzejącego się asfaltu [34–35].

Związki fenolowe wykazujące aktywność przeciwdrobnoustrojową mogą także znaleźć zastosowanie jako ekologiczne środki konserwujące drewno. Przykładowo flawonoidy, takie jak galangina i pinocembryna, wykazały skuteczność przeciwgrzy-

biczą wobec gatunków *G. applanatum*, *L. elegans*, *P. sanguineus*, *S. commune* i *A. niger* porównywalną z działaniem ketokonazolu. Z kolei substancje obecne w twardej części niektórych gatunków drzew, na przykład taksyfolina i dihydrokamferol, skutecznie odstraszały termity. Dodatkowo flawonoidy pełnią funkcję antyoksydantów, co pomaga chronić drewno przed degradacją spowodowaną działaniem wolnych rodników i wpływem środowiska [36]. Drewno *Prosopis juliflora* wykazuje wysoką odporność na grzyby powodujące zgniliznę białą i brunatną dzięki zawartości (-)mesquitolu, choć nie uznaje się go za jedyny czynnik wpływający na jego trwałość [37]. Przykładem synergicznego działania są również flawonoidy i stilbeny występujące w *Bagassa guianensis*, które także skutecznie chronią przed zgnilizną białą [38].

6. Wnioski

Związki fenolowe, dzięki swoim właściwościom biologicznym i funkcjonalnym, mają ogromny potencjał szerokiego zastosowania w przemyśle. Ich naturalne pochodzenie, bioaktywność oraz biodegradowalność czynią je atrakcyjną alternatywą dla syntetycznych dodatków stosowanych w sektorach takich, jak farmacja, kosmetyka, przemysł spożywczy czy tekstylny. Pomimo rosnącego zainteresowania nimi oraz postępu w technologiach ekstrakcji i oczyszczania, nadal istnieją jednak wyzwania związane z zapewnieniem stabilności i efektywności działania tych związków w produktach końcowych, zwłaszcza żywnościowych. Konieczne są dalsze badania nad mechanizmami działania i formami aplikacji, które pozwolą w pełni wykorzystać ich prozdrowotny i technologiczny potencjał przy jednoczesnym zachowaniu bezpieczeństwa stosowania.

Wkładem niniejszej pracy do nauki jest zestawienie i omówienie najnowszych doniesień dotyczących praktycznego wykorzystania związków fenolowych w różnych gałęziach przemysłu. Opracowanie to integruje rozproszone dane literaturowe, wskazuje możliwości zastosowania przemysłowego polifenoli, a także podkreśla ich potencjał do zastępowania substancji syntetycznych oraz wskazuje kierunki dalszych badań, mogące stanowić punkt odniesienia dla przyszłych prac eksperymentalnych i technologicznych.

Projekt został sfinansowany z subwencji badawczej Politechniki Białostockiej **Projekt doktorski WI/WB-IIŚ/18/2025**.

Literatura

- [1] Wahle, K. W. J., Brown, I., Rotondo, D., Heys, S. D. (2010). Plant phenolics in the prevention and treatment of cancer. In M. T. Giardi, G. Rea, B. Berra

- (Eds.), *Bio-farms for nutraceuticals. Functional food and safety control by biosensors* (pp. 36–51). Springer.
- [2] Lin, D., Xiao, M., Zhao, J., Li, Z., Xing, B., Li, X., Kong, M., Li, L., Zhang, Q., Liu, Y., Chen, H., Qin, W., Wu, H., Chen, S. (2016). An overview of plant phenolic compounds and their importance in human nutrition and management of type 2 diabetes. *Molecules*, 21(10), 1374.
 - [3] Kalinowska, M., Gryko, K., Gołębiewska, E., Świdorski, G., Lewandowska, H., Pruszyński, M., Zawadzka, M., Kozłowski, M., Sienkiewicz-Gromiuk, J., Lewandowski, W. (2022). Fe(III) and Cu(II) complexes of chlorogenic acid: Spectroscopic, thermal, anti-/pro-oxidant, and cytotoxic studies. *Materials*, 15(19), 6832.
 - [4] Lobiuc, A., Pavăl, N.-E., Mangalagiu, I. I., Gheorghită, R., Teliban, G.-C., Amăriucăi-Mantu, D., Stoleru, V. (2023). Future antimicrobials: Natural and functionalized phenolics. *Molecules*, 28(3), 1114.
 - [5] Cavalcante, F. M. L., Almeida, I. V., Düsman, E., Mantovani, M. S., Vicentini, V. E. P. (2018). Cytotoxicity, mutagenicity, and antimutagenicity of the gentisic acid on HTC cells. *Drug and Chemical Toxicology*, 41(2) 155–161.
 - [6] Stevenson, D. E., Hurst, R. D. (2007). Polyphenolic phytochemicals – just antioxidants or much more? *Cellular and Molecular Life Sciences*, 64(22), 2900–2916.
 - [7] Fonseca, Y. M., Catini, C. D., Vicentini, F. T. M. C., Nomizo, A., Gerlach, R. F., Fonseca, M. J. V. (2010). Protective effect of *Calendula officinalis* extract against UVB-induced oxidative stress in skin: Evaluation of reduced glutathione levels and matrix metalloproteinase secretion. *Journal of Ethnopharmacology*, 127(3), 596–601.
 - [8] Kumar, N., Goel, N. (2019). Phenolic acids: Natural versatile molecules with promising therapeutic applications. *Biotechnology Reports*, 24, e00370.
 - [9] Das, A., Rajkumar, V., Nanda, P., Chauhan, P., Pradhan, S., Biswas, S. (2016). Antioxidant efficacy of litchi (*Litchi chinensis* Sonn.) pericarp extract in sheep meat nuggets. *Antioxidants*, 5(2), 16.
 - [10] Loi, M., Quintieri, L., Fanelli, F., Caputo, L., Mulè, G. (2018). Application of a recombinant laccase-chlorogenic acid system in protein crosslink and antioxidant properties of the curd. *Food Research International*, 106, 763–770.
 - [11] Liu, J., Wang, X., Yong, H., Kan, J., Zhang, N., Jin, C. (2018). Preparation, characterization, digestibility and antioxidant activity of quercetin grafted Cynanchum auriculatum starch. *International Journal of Biological Macromolecules*, 114, 130–136.
 - [12] Caleja, C., Barros, L., Antonio, A. L., Oliveira, M. B. P. P., Ferreira, I. C. F. R. (2017). A comparative study between natural and synthetic antioxidants: Evaluation of their performance after incorporation into biscuits. *Food Chemistry*, 216, 342–346.

- [13] Murmu, S. B., Mishra, H. N. (2017). Optimization of the arabic gum based edible coating formulations with sodium caseinate and tulsi extract for guava. *LWT*, 80(1), 271–279.
- [14] Maryam Adilah, Z. A., Jamilah, B., Nur Hanani, Z. A. (2018). Functional and antioxidant properties of protein-based films incorporated with mango kernel extract for active packaging. *Food Hydrocolloids*, 74, 207–218.
- [15] Sganzerla, W. G., Rosa, G. B., Ferreira, A. L. A., da Rosa, C. G., Beling, P. C., Xavier, L. O., Hansen, C. M., Ferrareze Peruzzo, J., Nunes Ramos, M., Manique Barreto, P. L., de Lima Veeck, A. P. (2020). Bioactive food packaging based on starch, citric pectin and functionalized with Acca sellowiana waste by-product: Characterization and application in the postharvest conservation of apple. *International Journal of Biological Macromolecules*, 147(2), 295–303.
- [16] Zeng, P., Chen, X., Qin, Y.-R., Zhang, Y.-H., Wang, X.-P., Wang, J.-Y., Ning, Z.-X., Ruan, Q.-J., Zhang, Y.-S. (2019). Preparation and characterization of a novel colorimetric indicator film based on gelatin/polyvinyl alcohol incorporating mulberry anthocyanin extracts for monitoring fish freshness. *Food Research International*, 126, 108604.
- [17] Phan, K., van den Broeck, E., van Speybroeck, V., de Clerck, K., Raes, K., de Meester, S. (2020). The potential of anthocyanins from blueberries as a natural dye for cotton: A combined experimental and theoretical study. *Dyes and Pigments*, 176, 108180.
- [18] Jia, Y., Liu, B., Cheng, D., Li, J., Huang, F., Lu, Y. (2017). Dyeing characteristics and functionability of tussah silk fabric with oak bark extract. *Textile Research Journal*, 87(15), 1806–1817.
- [19] Liu, R., Dong, A., Fan, X., Yu, Y., Yuan, J., Wang, P., Wang, Q., Cavaco-Paulo, A. (2016). Enzymatic hydrophobic modification of jute fibers via grafting to reinforce composites. *Applied Biochemistry and Biotechnology*, 178(8), 1612–1629.
- [20] Sanchez-Sanchez, J., Fernández-Ponce, M. T., Casas, L., Mantell, C., de la Ossa, E. J. M. (2017). Impregnation of mango leaf extract into a polyester textile using supercritical carbon dioxide. *The Journal of Supercritical Fluids*, 128, 208–217.
- [21] Teklemedhin, T. B., Gebretsadik, T. T., Gebrehiwet, T. B., Gebrekidan, G. A., Edris, M., Teklegiorgis, N. T., Hagos, K. B. (2023). Vegetable tannins as chrome-free leather tanning. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2023(2), 1–11.
- [22] Xiao, Y., Zhou, J., Wang, C., Zhang, J., Radnaeva, V. D., Lin, W. (2023). Sustainable metal-free leather manufacture via synergistic effects of triazine derivative and vegetable tannins. *Collagen and Leather*, 5, 2.
- [23] Zhou, Y., Tawiah, B., Wang, L., Li, Q. (2022). Enhancing the affinity and adsorption efficiency of *Glochidion ericarpum* Champ leave extract to cotton for colouristic and functional properties integrating trimethyl chitosan and ultrasonic technique. *Industrial Crops and Products*, 186, 115255.

- [24] Cheng, T.-H., Liu, Z.-J., Yang, J.-Y., Huang, Y.-Z., Tang, R.-C., Qiao, Y.-F. (2019). Extraction of functional dyes from tea stem waste in alkaline medium and their application for simultaneous coloration and flame retardant and bio-active functionalization of silk. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 7, 18405–18413.
- [25] Kadam, S., Sharma, A., Islam, S., Bramhecha, I., Sheikh, J. (2020). Utilization of rice straw as a source of biomolecules for sustainable multifunctional finishing vis a vis dyeing of wool. *Journal of Natural Fibers*, 17(10), 1508–1518.
- [26] Giacomoni, P. U. Advancement in skin aging: The future cosmeceuticals. *Clinics in Dermatology*, 26(4), 364–366.
- [27] Mandal, S. M., Chakraborty, D., Dey, S. (2010). Phenolic acids act as signaling molecules in plant-microbe symbioses. *Plant Signaling & Behavior*, 5(4), 359–368.
- [28] Wu, L., Guo, L., Liang, Y., Liu, X., Jiang, L., Wang, L. (2015). Curcumin suppresses stem-like traits of lung cancer cells via inhibiting the JAK2/STAT3 signaling pathway. *Oncology Reports*, 34(6), 3311–3317.
- [29] Nichols, J. A., Katiyar, S. K. (2010). Skin photoprotection by natural polyphenols: anti-inflammatory, antioxidant and DNA repair mechanisms. *Archives of Dermatological Research*, 302(2), 71–83.
- [30] Moreira, L. C., de Ávila, R. I., Veloso, D. F. M. C., Pedrosa, T. N., Lima, E. S., do Couto, R. O., Lima, E. S., do Couto, R. O., Lima, E. M., Batista, A. C., de Paula, J. R., Valadares, M. C. (2017). *In vitro* safety and efficacy evaluations of a complex botanical mixture of *Eugenia dysenterica* DC. (Myrtaceae): Prospects for developing a new dermocosmetic product. *Toxicology in Vitro*, 45(Pt. 3), 397–408.
- [31] Keny, S. J., Kumbhar, A. G., Thinaharan, C., Venkateswaran, G. (2008). Gallic acid as a corrosion inhibitor of carbon steel in chemical decontamination formulation. *Corrosion Science*, 50(2), 411–419.
- [32] Velázquez-González, M. A., Gonzalez-Rodriguez, J. G., Valladares-Cisneros, M. G., Hermoso-Diaz, I. A. (2014). Use of *Rosmarinus officinalis* as green corrosion inhibitor for carbon steel in acid medium. *American Journal of Analytical Chemistry*, 5(2), 55–64.
- [33] Xie, S., Li, Q., Karki, P., Zhou, F., Yuan, J. S. (2017). Lignin as renewable and superior asphalt binder modifier. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 5(4), 2817–2823.
- [34] Hosseinneshad, S., Hung, A. M., Mousavi, M., Sharma, B. K., Fini, E. (2020). Resistance mechanisms of biomodified binders against ultraviolet exposure. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 8(6), 2390–2398.
- [35] Li, C., Rajib, A., Sarker, M., Liu, R., Fini, E. H., Cai, J. (2021). Balancing the aromatic and ketone content of bio-oils as rejuvenators to enhance their efficacy in restoring properties of aged bitumen. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 9(20), 6912–6922.

- [36] Quiroga, E. N., Sampietro, D. A., Soberon, J. R., Sgariglia, M. A., Vattuone, M. A. (2006). Propolis from the northwest of Argentina as a source of antifungal principles. *Journal of Applied Microbiology*, 101(1), 103–110.
- [37] Sirmah, P., Dumarçay, S., Masson, E., Gérardin, P. (2009). Unusual amount of (–)-mesquitol from the heartwood of *Prosopis juliflora*. *Natural Product Research*, 23(2), 183–189.
- [38] Royer, M., Rodrigues, A. M. S., Herbette, G., Beauchêne, J., Chevalier, M., Hérault, B., Thibaut, B., Stien, D. (2012). Efficacy of *Bagassa guianensis* aubl. extract against wood decay and human pathogenic fungi. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 70, 55–59.

Internacjonalizacja przedsiębiorstw z branży *automotive* w Polsce oczami pracowników

Marta Czernecki-Wilczyńska

Katedra Ekonomii i Informatyki

Wydział Organizacji i Zarządzania

Politechnika Śląska

*marta.czernecki-wilczynska@polsl.pl

Abstract: The automotive industry in Poland and around the world is experiencing growth, but every company must adapt to ever-changing market conditions. The decision to internationalize a company has great benefits, such as a better market position and greater adaptability to market challenges, but also requires management to implement long-term solutions. Nevertheless, the internationalization process is a source of rich experience for companies and excellence should therefore be pursued, taking into account the opinions of employees, among others.

Key words: internationalization, automotive industry

1. Wstęp

Współczesny świat wymaga od ludzi dostosowania się do szybko zmieniającej się technologii. Nie jest to łatwe zadanie, zwłaszcza że coraz większy nacisk kładzie się na kwestie związane z zarządzaniem jakością. W branży motoryzacyjnej jakość wiąże się nie tylko z sukcesem ekonomicznym przedsiębiorstw, ale także z bezpieczeństwem klientów, którzy są użytkownikami samochodów produkowanych na całym świecie. Specyfika pracy zakładów zlokalizowanych w Polsce pozwala na kontakt z firmami z tej samej branży na całym świecie. W naszym kraju przemysł motoryzacyjny rozwija się niezwykle dynamicznie, jednak są też obszary, gdzie produkcja jest na tyle nieopłacalna, że zakłady są zamykane. Dynamika zmian udziału przemysłu *automotive* w polskim PKB również przeżywa wznioły i upadek, ale mimo wszystko rynek polski pozostaje dla tej branży bardzo korzystny [1]. Internacjonalizacja firm zlokalizowanych w Polsce jest niezwykle ważnym aspektem, dzięki któremu państwo polskie i jego przemysł motoryzacyjny mogą być konkurencyjne na rynku międzynarodowym.

Internacjonalizacja to proces, który nie pojawia się w firmie nagle i równie szybko znika. To podejście do zarządzania przedsiębiorstwem w taki sposób, aby mogło ono funkcjonować na rynku międzynarodowym w długim okresie. Ze względu na jego indywidualny charakter dla każdej organizacji stanowi ona złożony proces, w którym przeplatają się aspekty ekonomiczne, społeczne i kulturowe. Celem niniejszego artykułu jest analiza wyników badań ankietowych związanych z zaangażowaniem ludzi,

kierownictwa, podejściem procesowym i ciągłym doskonaleniem, przeprowadzonych wśród pracowników polskich przedsiębiorstw z branży *automotive*. Badania zostały wykonane w okresie od stycznia do marca 2025. Udział w anonimowej ankiecie wzięło 300 osób.

2. Istota jakości i internacjonalizacji

W czasach, w których funkcjonowanie przedsiębiorstwa jest ściśle związane z zarządzaniem jakością i normami regulującymi jej zasady w miejscu pracy, szczególnie ważnym aspektem okazuje się zrozumienie pojęcia jakości, w jak najszerszym tego słowa znaczeniu. Jakość towarzyszy człowiekowi już od czasów starożytnych, ponieważ od momentu, gdy ludzie zaczęli wytwarzać sami pewne przedmioty, zastanawiali się także, wraz z upływem czasu, w jaki sposób mogą ułatwiać sobie życie. Starożytni Egipcjanie opierali budowy piramid na kontroli oraz efektywnym komunikowaniu się [2]. Według Platona jakość była „pewnym stopniem doskonałości”, określanym w języku greckim jako *poiotes*. Uważał on, że otaczająca rzeczywistość jest nieprecyzyjnym odzwierciedleniem istniejących idei [3]. Kolejnym filozofem, który nadał nowe, epistemologiczne znaczenie jakości, był Arystoteles. Określił on jakość jako element należący do grupy kategorii opisujących rzeczywisty świat i mogących dzielić wszelkie pojęcia na logiczne zbiory:

- a) miejsce,
- b) czas,
- c) substancję,
- d) ilość.

Ponadto definiował ją jako zestaw cech, który odróżnia dany przedmiot od reszty należących do takiego samego rodzaju [3].

Jakość można rozumieć, ujmując jej pojęcie w kontekście ekonomicznym lub technicznym, ogólnym, użytkowym i biznesowym [4]. Każdy z powyższych kontekstów ukazuje ją w odmiennym świetle i przedstawia jej rozmaite charaktery.

Tabela 1. Konteksty jakości

Kontekst	Ogólny	Użytkowy	Biznesowy	Techniczny
Z kim związany?	obiektywni obserwatorzy	konsumenci, klienci	biznes	wykonawcy
Czego dotyczy?	nierozłączne cechy produktu, typ, klasa	spełnienie wymagań przez produkt	korzyści związane z ekonomią	zgodność wykonania produktu z projektami

Źródło: opracowanie własne na podstawie [4].

Należy zastanowić się, jakie cechy produktów wpływają na postrzeganie ich jakości. Każdy wyrób lub usługa posiada bowiem swoją jakość, na którą składają się:

1. Właściwości procesowe – określane w trakcie projektowania produktu, poddawane kontroli na etapie procesu produkcji lub wykonywania usługi. Są to właściwości najczęściej niezauważalne dla klienta [4]. Przykładowo przy produkcji samochodu na każdym etapie muszą być użyte materiały o odpowiednich właściwościach i urządzenia o odpowiedniej kalibracji bądź działaniu, które finalnie wpłyną na całokształt niezawodności pojazdu.
2. Metawłaściwości.
3. Właściwości marketingowe – klienci, oceniając jakość oferowanych przez przedsiębiorstwo usług i produktów, największą uwagę zwracają m.in. na efektywność, bezpieczeństwo usługi, ekologiczność, czas oczekiwania i realizacji usługi oraz profesjonalizm i umiejętności osób, które wykonują usługę lub uczestniczą w procesie tworzenia wyrobu. Czynniki ludzkie są niezbędne, aby zachować odpowiednią jakość usług i oferowanych wyrobów.

Internacjonalizacja jest ściśle połączona z jakością. Umiedzynarodowienie przedsiębiorstwa pozwala na jeszcze efektywniejszy rozwój systemów zarządzania jakością, jednak należy mieć na uwadze, że bardzo ważna jest także krajowa polityka gospodarcza, dzięki której branża *automotive* ma szansę na dostosowywanie się do zmiennych warunków panujących na arenie międzynarodowej [5]. Definicji internacjonalizacji jest bardzo wiele. Niektóre z podejść zostały przedstawione w tabeli 2.

Tabela 2. Definicje internacjonalizacji

Twórca/y definicji	Definicja
Dalmoro-Costa, Freitas Camboin i Carneiro-Zen	Internacjonalizacja pozwala przedsiębiorstwom eksplorować inne rynki i dzięki temu rozpoczynać nowe aktywności biznesowe oraz osiągać dodatkowe korzyści [6]
Boddewyn	Internacjonalizacja charakteryzuje się pewną formą międzynarodowego zaangażowania lub zaangażowania w działalność transgraniczną, taką jak handel zagraniczny i/lub inwestycje zagraniczne [7]
Calof i Beamish	Internacjonalizacja to proces dostosowywania działań firmy do wymagań otoczenia [8]
Coviello i Munro	Internacjonalizacja to produkt uboczny wysiłków firmy zmierzających do poprawy jej pozycji w sieciach biznesowych [8]
Welch i Luostarinen	Internacjonalizacja to dynamiczne zjawisko rozumiane jako proces stopniowego zwiększania poziomu zaangażowania firmy na rynku zagranicznym [8]

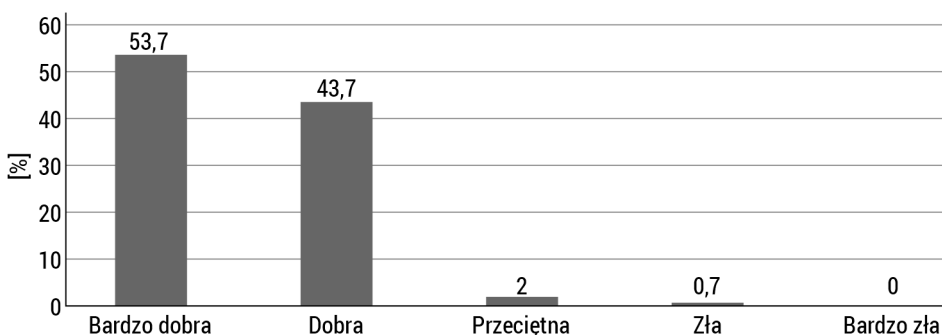
Źródło: opracowanie własne na podstawie [8].

W dostępnej literaturze pojawiają się następujące definicje internacjonalizacji:

- EP (ang. *eclectic paradigm*) – zaproponowana przez Dunninga, według której przedsiębiorstwa chcące osiągnąć pewien stopień internacjonalizacji muszą być skupione na trzech aspektach: internalizacji, własności i lokalizacji [9, 10];
- UP (ang. *Uppsala model*) – opiera się na teoriach behawioralnych i dzieli proces internacjonalizacji na etapy, które zależą od posiadanej wiedzy na temat rynku i zaangażowania firmy [11];
- rozpiętość internacjonalizacji (ang. *breadth of internationalization*) – związana z ekspansją geograficzną, która to dotyczy głównie liczby filii i oddziałów firmy za granicą [12];
- głębokość internacjonalizacji (ang. *depth of internationalization*) – określa, w jakim stopniu przedsiębiorstwo pojawia się na rynku poza krajem macierzystym i wykorzystuje do tego celu wskaźniki związane m.in z zatrudnieniem i sprzedażą poza granicami kraju macierzystego [13].

3. Wyniki

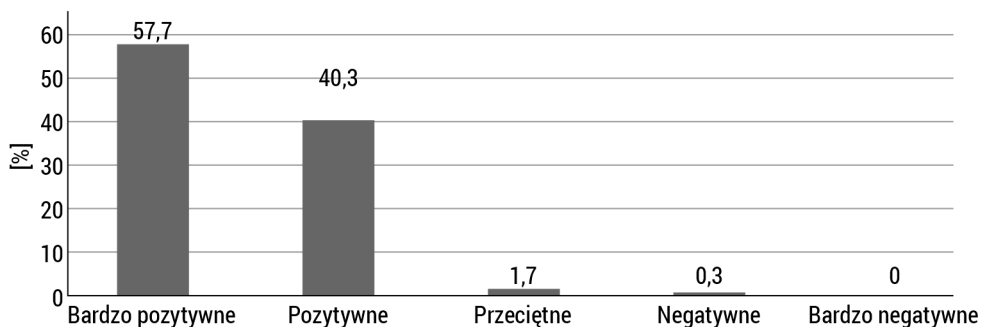
Przeprowadzono badania ankietowe wśród 300 osób pracujących w przedsiębiorstwach z branży *automotive* (niezależnie od szczebla zatrudnienia), które posiadają zintegrowane systemy zarządzania jakością i wdrożoną normę motoryzacyjną IATF 16949. Badania dotyczyły oceny pozycji rynkowej przedsiębiorstw, nastawienia kierownictwa do procesów umiędzynarodowienia oraz oceny poziomu dojrzałości systemów zarządzania jakością związanego z wynagradzaniem i podejściem do pracownika.



Rysunek 1. Ocena pozycji rynkowej przedsiębiorstw z branży *automotive* w Polsce

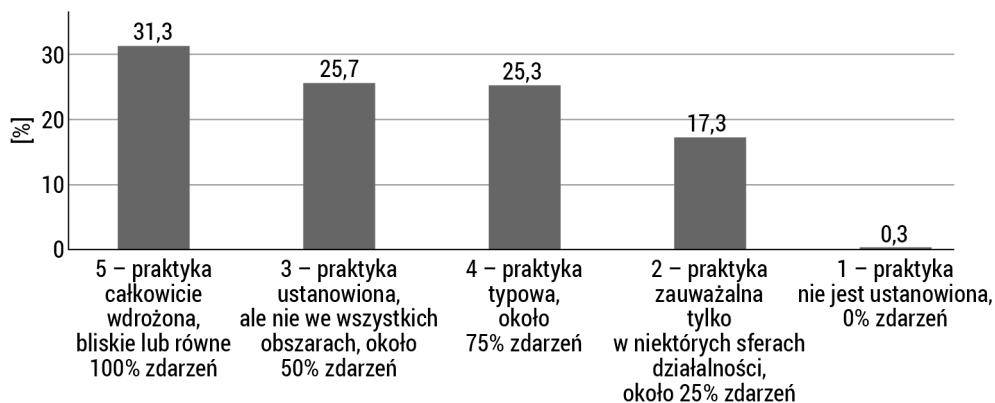
Źródło: opracowanie własne.

Spośród badanych ponad połowa wskazała, że pozycja rynkowa ich przedsiębiorstwa w Polsce jest bardzo dobra. Około 44% respondentów określiło ją jako dobrą, a 2% jako przeciętną. Można więc stwierdzić, że wdrażanie systemów zarządzania jakością jest bardzo dobrą decyzją z perspektywy funkcjonowania przedsiębiorstw i organizacji w kontekście pozycji rynkowej w Polsce i na świecie.



Rysunek 2. Ocena nastawienia kierownictwa do procesów umiędzynarodowienia przedsiębiorstwa
Źródło: opracowanie własne.

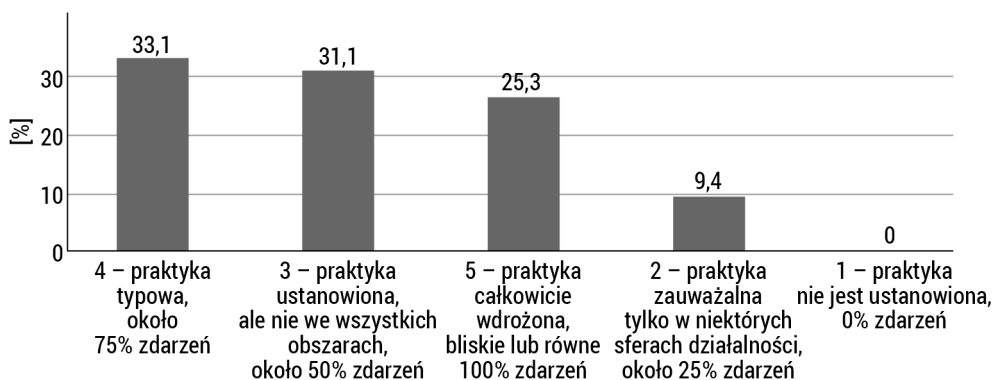
Proces internacjonalizacji jest bardzo korzystny dla przedsiębiorstw (nie tylko z branży samochodowej) ze względu na możliwość korzystania z doświadczeń innych firm, zlokalizowanych na całym świecie, oraz współpracy z nimi. Warunkuje to rozwój firmy i wzrost jej konkurencyjności. Prawie 58% respondentów na pytanie o nastawienie kierownictwa ich przedsiębiorstwa do procesów internacjonalizacji odpowiedziało, że jest ono bardzo pozytywne. Oznacza to, że kierownicy oraz pracownicy wyższych szczebli prawdopodobnie będą podejmować działania na rzecz internacjonalizacji i doskonalenia systemów zarządzania jakością.



Rysunek 3. Ocena, czy na każdym poziomie zatrudnienia pracownik traktowany jest jako ważny składnik przedsiębiorstwa, mający wpływ na sukces firmy
Źródło: opracowanie własne.

Dojrzałość systemów zarządzania jakością (SZJ) w przedsiębiorstwach respondencji mogli ocenić w skali od 1–5. Ocena 1 odpowiada praktyce nieustanowionej, kiedy dana sytuacja nie zdarza się wcale (0% zdarzeń), natomiast 5 oznacza praktykę całkowicie wdrożoną (100% zdarzeń lub prawie 100%). W przypadku pytania o traktowanie pracowników jako ważnego składnika firmy, których działania są istotnym czynnikiem

warunkującym sukces przedsiębiorstwa, prawie 26% respondentów określiło dojrzałość na poziomie 3 (praktyka ustanowiona, ale nie we wszystkich obszarach – ok. 50% zdarzeń). Jest to sygnał, że istnieją takie obszary zarządzania przedsiębiorstwem, w których pracownicy nie są traktowani jako znaczący dla firmy.



Rysunek 4. Ocena poziomu dojrzałości systemów zarządzania jakością pod względem ważności wynagradzania pracowników i wyrażania uznania za wykonaną pracę

Źródło: opracowanie własne.

Respondenci, zapytani o to, czy ważne jest wynagradzanie i wyrażanie uznania w stosunku do pracowników za pracę, w 33% ocenili dojrzałość systemów na poziomie 4, zaś w 31% na poziomie 3. Istnieją zatem takie sytuacje, w których pracownik nie jest odpowiednio wynagradzany.

Wśród respondentów zostały również zbadane motywy, którymi kierują się przedsiębiorstwa, aby wejść w proces internacjonalizacji, a także formy internacjonalizacji dotychczas przyjęte przez firmy. Wyniki przedstawiono w tabelach 3 i 4.

Tabela 3. Znaczenie poszczególnych motywów umiędzynarodowienia w polskich przedsiębiorstwach z branży *automotive*

Motywy/znaczenie	Bardzo małe	Małe	Średnie	Duże	Bardzo duże
Kosztowe	0	8	27	106	159
Polityczne	4	11	113	80	92
Związane z działalnością na rynku	0	3	70	118	109
Inne	34	51	56	74	85

Źródło: opracowanie własne.

Tabela 4. Główne motywacje internacjonalizacji polskich firm z branży *automotive*

Forma internacjonalizacji	Udział odpowiedzi (%)
Eksport pośredni i bezpośredni	98,7%
Import pośredni i bezpośredni	98,3%
Franczyza	50,7%
Spółki zależne	34%
Filie i oddziały	10,7%
Sprzedaż licencji	4,7%

Źródło: opracowanie własne.

Istnieje wiele motywacji, pod wpływem których przedsiębiorstwa decydują się na wprowadzenie zmian w celu osiągnięcia zamierzonego stopnia internacjonalizacji. Badana część populacji pracującej w polskim przemyśle samochodowym na pytanie o znaczenie poszczególnych motywacji odpowiedziała, że największą wagę mają motywety finansowe, następnie związane z działalnością firmy na rynku, zaś w mniejszym stopniu motywety polityczne.

Do najpopularniejszych form internacjonalizacji przedsiębiorstw z branży *automotive* należą eksport (pośredni i bezpośredni) oraz import (pośredni i bezpośredni), zatem kierunki, które są już dobrze poznane. Najmniej popularne są sprzedaż licencji oraz internacjonalizacja poprzez filie i oddziały w kraju i za granicą. Jest to przestrzeń niewykorzystana przez polskie przedsiębiorstwa z samochodowej gałęzi przemysłu, co daje możliwość rozważenia potencjalnych przyszłych rozwiązań, tak aby udział tego typu form internacjonalizacji w ich ogólnej liczbie był większy.

4. Podsumowanie

Internacjonalizacja to proces niezbędny dla rozwoju przedsiębiorstw z różnych gałęzi przemysłu, złożony i indywidualny dla każdej organizacji. Pracownicy, którzy najlepiej znają przedsiębiorstwo, są w stanie określić, w których obszarach zarządzania jakością występują braki.

Jak wynika z dotychczas przeprowadzonych badań, istnieją obszary, w których dojrzałość systemów zarządzania jakością powinna być doskonała. Są to m.in. relacje kierownictwa z pracownikami (kwestie związane z wynagradzaniem i docenianiem za pracę) oraz poczucie bycia ważnym w przedsiębiorstwie odczuwane przez pracowników. Dzięki regularnym pomiarom zadowolenia wśród osób zatrudnionych kierownictwo jest w stanie wdrażać na bieżąco rozwiązania mające na celu poprawę tzw. *wellbeing* na wszystkich szczeblach zatrudnienia. Co istotne, sam proces internacjonalizacji, a także jej poziom w danej firmie są ściśle związane z poziomem zatrudnienia, dlatego bardzo ważne jest uwzględnianie czynnika ludzkiego przy dążeniu do umiędzynarodowienia przedsiębiorstwa.

Przemysł samochodowy w Polsce i na świecie przeżywa obecnie okres wzmożonego rozwoju, jednak każde przedsiębiorstwo musi na bieżąco dostosowywać się do wciąż ewoluujących warunków na rynku. Decyzja o umiędzynarodowieniu firmy wiąże się z dużymi korzyściami, takimi jak lepsza pozycja na rynku i łatwość przystosowywania się do wyzwań rynkowych, ale wymaga także od kierownictwa wdrażania różnych długoterminowych rozwiązań. Niemniej jednak proces internacjonalizacji stanowi dla firm bogate źródło doświadczenia.

Literatura

- [1] Drozd, A. (2022). Rynek motoryzacyjny w Polsce w latach 2015–2020. *Prace Naukowe UE we Wrocławiu*, 66(3), 14–24.
- [2] Wojtaszek, H. (2014). Od historii metod zarządzania do sprawnego funkcjonowania organizacji. *Zarządzanie*, 1, 347–356.
- [3] Roszak, M. (2014). Istota i zakres jakości. In M. Roszak (Ed.), *Zarządzanie jakością w praktyce inżynierskiej* (Vol. 1(31), pp. 11–34).
- [4] Hamrol, A. (2023). *Zarządzanie i inżynieria jakości ze spojrzeniem w rzeczywistość 4.0*. Wydawnictwo Naukowe PWN.
- [5] Krasova, E. (2018). Characteristics of global automotive industry as a sector with high levels of production internationalization. *Amazonia Investiga*, 16(7), 84–93.
- [6] Dalmoro Costa, A., Camboim, G., Carneiro-Zen, A. (2018). Internationalization patterns and their effects on company performance. *Journal of Operations and Supply Chain Management*, 11(1), 53.
- [7] Boddewyn, J. (1997). The conceptual domain of international business: territory, boundaries, and levels. In B. Toyne, D. Nigh (Eds.), *International business: An emerging vision* (pp. 50–61). University of South Carolina Press.
- [8] Morales, J. (2020). Internationalization: An analysis of 26 definitions. *Intersticios Sociales*, 19, 87–99.
- [9] Dunning, J. (1980). Toward an eclectic theory of international production: Some empirical tests. *Journal of International Business Studies*, 11(1), 9–31.
- [10] Dunning, J. (1981). *International production and the multinational enterprise*. Allen and Unwin.
- [11] Kubickova, L. (2013). Limits of the Uppsala model application in the internationalization process of Czech SMEs. *European International Journal of Science and Technology*, 9(2), 247.
- [12] Hsu, C.-W., Lien, Y.-C., Chen, H. (2013). International ambidexterity and firm performance in small emerging economies. *Journal of World Business*, 48(1), 68–67.
- [13] Kaczmarek, S., Ruigrok, W. (2013). In at the deep end of firm internationalization. *Management International Review*, 6(52), 520.

Polityka celna jako narzędzie wspierania lokalnej przedsiębiorczości – analiza protekcjonizmu rolnego na przykładzie Polski w ramach UE

Ewelina Mazewska

Wydział Ekonomii i Finansów

Uniwersytet w Białymstoku

mazewska.ewelina@wp.pl

Abstract: Agricultural protectionism is an important part of the European Union's customs policy and one of the foundations of the Common Agricultural Policy. The purpose of this paper is to show how instruments such as tariffs, quotas and sanitary rules influence the development of agricultural entrepreneurship in Poland. The study uses trade data from 2010–2023. The results indicate that protectionist measures not only protect EU farmers from cheaper imports from third countries but also help to stabilize the market and create conditions for business activity in rural areas.

Key words: customs policy, agricultural protectionism, Poland, European Union

1. Wstęp

Polityka celna odgrywa kluczową rolę w kształtowaniu warunków konkurencji w relacjach handlowych z państwami trzecimi. W ramach Unii Europejskiej kraje członkowskie, w tym Polska, stosują wspólną politykę celną, która ma na celu nie tylko ochronę rynku unijnego, ale także wspieranie lokalnych sektorów gospodarki. Szczególnie wrażliwym obszarem pozostaje sektor rolny, narażony na zmienność cen oraz konkurencyjność cenową ze strony producentów spoza UE. W tym kontekście działania protekcjonistyczne – takie jak cła, kontyngenty importowe czy normy fitosanitarne – stają się narzędziami umożliwiającymi ochronę interesów krajowych producentów rolnych. Warto zauważyć, że protekcjonizm nie tylko chroni rynek przed zewnętrzną konkurencją, ale także aktywnie wspiera lokalnych producentów i przetwórców żywności działających w ramach rynku unijnego. W ten sposób przyczynia się do ożywienia przedsiębiorczości wiejskiej oraz rozwoju obszarów wiejskich.

W praktyce protekcjonizm rolny przejawia się poprzez nakładanie wysokich cł na import produktów rolnych spoza UE, wprowadzanie kontyngentów taryfowych, subsydiowanie rodzimej produkcji oraz regulowanie rynku w sposób, który ma na celu ochronę unijnych producentów przed wahaniami cen i nadmierną konkurencją ze strony krajów trzecich.

Celem niniejszej pracy jest ocena, w jakim zakresie polityka celna Unii Europejskiej, poprzez stosowanie mechanizmów protekcjonizmu rolnego, przyczynia się do wspierania lokalnej przedsiębiorczości w Polsce. Analizie poddano w szczególności wpływ cel rolnych, kontyngentów taryfowych i norm jakościowych na konkurencyjność polskich producentów i rozwój gospodarczy obszarów wiejskich.

2. Polityka celna Unii Europejskiej a rozwój lokalnej przedsiębiorczości w sektorze rolnym w Polsce

Z roku na rok znaczenie podatku celnego maleje w obliczu globalizacji, uproszczeń w handlu oraz rozwoju ogólnoswiatowych łańcuchów dostaw, co przyczynia się do ograniczenia jego wpływu na wymianę handlową. Mimo to wiele państw korzysta z systemów taryfowych i pozataryfowych, aby chronić swoich producentów i utrzymać konkurencyjność na rynkach międzynarodowych.

Handel zagraniczny jest to odpłatna wymiana towarów lub usług z partnerami posiadającymi stałą siedzibę poza granicą celną państwa. Polityka handlowa kraju nazywana jest także zagraniczną polityką gospodarczą i reprezentuje formę działalności gospodarczej każdego kraju. Decyduje o wielkości, kierunku i strukturze obrotów handlu zagranicznego. Jej celem jest ochrona krajowej produkcji i zatrudnienia, a także bilansu handlowego za pomocą różnych środków. Instrumenty taryfowe i pozataryfowe służą jako środki do realizacji polityki handlowej i celnej [1].

Układ Ogólny o Taryfach Celnych i Handlu był organizacją, która zapoczątkowała liberalizację handlu światowego. Porozumienie handlowe, podpisane 30 października 1947 roku w Genewie po licznych negocjacjach, stało się podstawą do utworzenia Światowej Organizacji Handlu (WTO). Kluczowymi celami nowo utworzonej instytucji były: wyeliminowanie ograniczeń utrudniających rozwój handlu, obniżenie obowiązujących stawek maksymalnych, rzeczywista ocena sytuacji handlu międzynarodowego, a także rozstrzyganie zaistniałych sporów między państwami członkowskimi. Oznacza to, że najważniejszym celem była liberalizacja handlu międzynarodowego, a tym samym stworzenie na arenie międzynarodowej warunków, które są zbliżone do idei wolnej konkurencji [2].

Wejście Polski do UE przyniosło największą w historii, począwszy od średniowiecza, zmianę w funkcjonowaniu cel jako narzędzia do kształtowania dochodów budżetu państwa. Przystępując do UE, nasz kraj zobowiązany został do przyjęcia i respektowania prawa unijnego, w tym ustawodawstwa i orzecznictwa zwanych *acquis communautaire*.

Przystąpienie Polski do gospodarczo-politycznego związku, a tym samym do unii celnej spowodowało, że krajowe prawo celne zostało zastąpione prawem unijnym. Polska po wstąpieniu do UE przyjęła wartości wspólne dla wszystkich narodów członkowskich, a przede wszystkim demokrację, poszanowanie godności ludzkiej, wolność i równość każdego obywatela.

Podstawę regulacji prawnych z zakresu prawa celnego stanowią obecnie rozporządzenia Parlamentu Europejskiego i Rady Europejskiej, które zapewnić mają bezpośrednie, skuteczne i jednakowe stosowanie prawa celnego we wszystkich krajach członkowskich [3]. Ponadto obowiązują jednocześnie normy i zasady prawne ustanowione przez polskiego ustawodawcę, czyli Sejm Rzeczypospolitej, regulujące zasady postępowania przy imporcie i eksporcie towarów na obszarze celnym UE.

Unia celna UE ułatwia handel unijnym przedsiębiorstwom, harmonizuje stawki celne na towary spoza Unii oraz pomaga chronić europejskich obywateli, zwierzęta oraz środowisko. Wszystkie z 27 państw członkowskich UE, w tym Polska, utworzyły unię celną w celu zniesienia celi na granicach wewnętrznych pomiędzy państwami członkowskimi. Dodatkowo, w przypadku produktów importowanych spoza UE, cła są ustanawiane ogólnie dla wszystkich krajów w całej Unii.

W praktyce unia celna oznacza, że władze wszystkich krajów UE współpracują ze sobą tak, jakby były jednym organem. Kraje członkowskie respektują te same zasady celne dotyczące towarów importowanych na swoje terytorium z zagranicy, co oznacza, że nie stosują taryf celnych na rynku wewnętrznym. Dla państw członkowskich oznacza to brak opłat celnych za transport dóbr z jednego kraju do drugiego. Cła na towary importowane do UE stanowią 14% całkowitego budżetu Unii i są częścią budżetu zwanego „tradycyjnym zasobem własnym” [4].

Kontrole celne przeprowadzane na zewnętrznych granicach UE chronią jej obywateli przed produktami, które mogą być niebezpieczne lub szkodliwe. Kontrole zabezpieczają również zwierzęta i środowisko naturalne, zwalczając nielegalny handel zagrożonymi gatunkami oraz zapobiegając rozprzestrzenianiu się chorób roślin i zwierząt.

Każdy kraj ma unikalny system podatkowy, który jest ściśle powiązany z systemem politycznym tego państwa, a także poziomem jego rozwoju gospodarczego. Nawet w obrębie UE, pomimo zasady unifikacji fiskalnej, każdy kraj ma inny system fiskalny. Celem harmonizacji nie jest bowiem wprowadzenie identycznych systemów podatkowych, lecz ich ujednolicenie w taki sposób, by prosperowanie poszczególnych państw było zgodne z celami Unii [5].

Podsumowując, polityka celna UE jest wspólną polityką wszystkich państw członkowskich, zarządzaną centralnie przez instytucje unijne. Jej główne cele obejmują ochronę rynku wewnętrznego, wsparcie legalnego handlu międzynarodowego, zapewnienie bezpieczeństwa granic oraz egzekwowanie przepisów unijnych dotyczących handlu, ochrony środowiska, zdrowia i własności intelektualnej. Unia tworzy spójny obszar celny, w którym pomiędzy państwami członkowskimi nie ma celi, a wobec krajów spoza UE stosowana jest wspólna taryfa celna.

3. Cła rolne i kontyngenty taryfowe w UE – studium przypadków (zboża, drób, nabiał)

Protekcjonizm rolny jest kluczowym elementem polityki celnej UE i stanowi jeden z głównych filarów Wspólnej Polityki Rolnej. Jednym z najbardziej zauważalnych aspektów tej ochrony są wysokie stawki celne na import produktów rolnych, takich jak zboża, mięso drobiowe czy nabiał, z krajów trzecich. Celem takich działań jest ochrona unijnych rolników przed konkurencją zewnętrzną, która często funkcjonuje w oparciu o znacznie niższe koszty produkcji.

Protekcjonizm rolny stanowi jeden z filarów Wspólnej Polityki Rolnej. Do jego najważniejszych mechanizmów należą:

- cła importowe, na przykład mechanizm ceny wejścia na zboża;
- kontyngenty taryfowe, na przykład ograniczenie importu mięsa drobiowego z Brazylii czy Ukrainy;
- cła antydumpingowe – stosowane wobec produktów mleczarskich i drobiowych sprzedawanych poniżej kosztów produkcji;
- normy sanitarne i fitosanitarne – chroniące zdrowie ludzi i zwierząt.

Dzięki powyższym instrumentom UE chroni rynek wewnętrzny przed destabilizacją i wspiera lokalnych producentów.

Podwyższone cła mają na celu stabilizację rynku wewnętrznego UE, co zapewnia rolnikom przewidywalność dochodów oraz ogranicza ryzyko nadmiernych wahań cen. Działania te przyczyniają się również do zapewnienia bezpieczeństwa żywnościowego w Europie, wspierając lokalną produkcję i ograniczając zależność od importu.

W przypadku zbóż, takich jak pszenica czy kukurydza, Unia stosuje mechanizm ceny wejścia. Oznacza to, że jeśli cena zboża importowanego z krajów trzecich jest niższa od ustalonego progu, nakładane są dodatkowe cła, co znacznie zwiększa koszty wprowadzenia go na rynek krajów należących do UE. Podobne zasady obowiązują w przypadku mięsa drobiowego, w szczególności importowanego z Brazylii czy Ukrainy, które podlega wysokim cłom i kontyngentom taryfowym. Oznacza to, że tylko określona ilość towaru może być importowana do krajów UE po preferencyjnych stawkach celnych, a każda nadwyżka ponad ten limit objęta jest znacząco wyższym cłem. Również produkty mleczarskie, takie jak mleko w proszku, sery czy masło, podlegają wysokim opłatom celnym, co chroni europejski rynek przed napływem taniego nabiału z zagranicy.

Cła antydumpingowe na import drobiu i produktów mlecznych z krajów trzecich pełnią kluczową rolę w ochronie interesów lokalnych producentów. Stanowią one szczególne narzędzie handlowe, które może zostać wykorzystane wtedy, gdy zagraniczni producenci sprzedają swoje towary na rynku unijnym po cenach niższych od kosztów produkcji lub poniżej cen obowiązujących na własnych rynkach.

Taka praktyka, znana jako dumping, może znacząco zaburzyć równowagę konkurencyjną, prowadzić do obniżenia cen w UE oraz osłabienia lokalnej produkcji, a w skrajnych przypadkach – do bankructwa unijnych przedsiębiorstw.

Podobne zjawiska można zaobserwować w sektorze nabiału, gdzie niektóre kraje eksportujące mleko w proszku, sery czy masło usiłują sprzedawać swoje nadwyżki produkcyjne na rynku unijnym po cenach dumpingowych. Dla unijnych producentów, zwłaszcza dla małych i średnich gospodarstw, oznacza to stratę dochodów i wypieranie ich z rynku.

Cła antydumpingowe są zatem nie tylko narzędziem ochrony gospodarczej, ale także instrumentem utrzymywania uczciwej konkurencji i stabilności na wewnętrznym rynku unijnym. Pomagają one zachować równowagę między handlem międzynarodowym a interesami lokalnych społeczności rolniczych, które nierzadko opierają swoje utrzymanie na produkcji drobiu czy mleka. Dzięki tym środkom Unia ma możliwość ochrony miejsc pracy, wsparcia rozwoju obszarów wiejskich oraz promowania samowystarczalności żywnościowej.

4. Wyniki

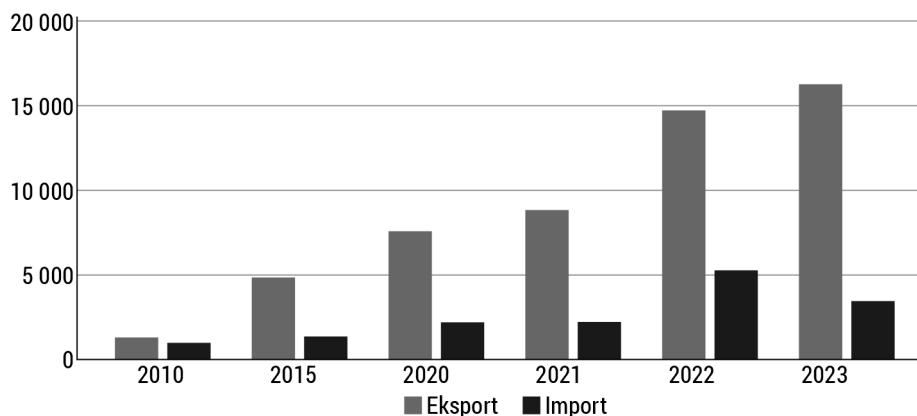
Współczesna polityka gospodarcza UE harmonijnie łączy zasady wolnego rynku z koniecznością ochrony lokalnych interesów ekonomicznych, szczególnie w obszarze rolnictwa. Polityka celna, jako kluczowe narzędzie regulujące handel z krajami trzecimi, odgrywa fundamentalną rolę w tworzeniu odpowiednich warunków dla funkcjonowania przedsiębiorstw w państwach członkowskich. Jest to szczególnie istotne w sektorze rolnym, który cechuje się dużą wrażliwością na międzynarodową konkurencję. Mechanizmy ochronne, takie jak cła, kontyngenty importowe czy normy sanitarne, mają znaczący wpływ na rozwój lokalnej przedsiębiorczości.

Przeprowadzona analiza została oparta na danych Głównego Urzędu Statystycznego oraz Eurostatu za lata 2010–2023. Uwzględniono zarówno handel z krajami trzecimi, gdzie stosowane są cła i kontyngenty, jak i wymianę wewnątrzunijną, która odbywa się bez ceł. Do badań wybrano cztery grupy produktów szczególnie istotnych dla polskiego rolnictwa: zboża, warzywa, mięso i podroby jadalne oraz produkty mleczarskie (w tym jaja i miód). Zastosowano analizę porównawczą zmian w eksporcie, imporcie i saldzie handlowym, a także interpretację danych w kontekście instrumentów unijnej polityki celnej.

Celem przeprowadzonych badań było zbadanie, w jakim zakresie polityka celna UE, realizowana również przez Polskę, może pełnić funkcję protekcyjną i wspierać lokalnych producentów rolnych. Szczegółowa analiza skupiła się na efektywności tych działań w kontekście polskiego rolnictwa, które, mimo integracji z rynkiem unijnym, wciąż stawia czoła licznym wyzwaniom związanym z globalną konkurencją.

Rysunek 1 przedstawia wartości importu i eksportu zbóż wyrażone w milionach złotych. W latach 2010–2023 wartość eksportu zbóż z Polski wzrosła w imponującym

tempie. Jej największy skok miał miejsce po roku 2020, kiedy to między latami 2020 a 2022 wzrosła ona niemal dwukrotnie – z 7 623,5 mln zł do 14 715 mln zł. To gwałtowne zwiększenie mogło być efektem zarówno rosnącej krajowej produkcji zbóż, jak i zwiększonego zapotrzebowania na nie w krajach importujących, co było szczególnie widoczne w kontekście zakłóceń na rynkach światowych spowodowanych wojną w Ukrainie.



Rysunek 1. Import i eksport zbóż wyrażone w milionach złotych (ceny bieżące)

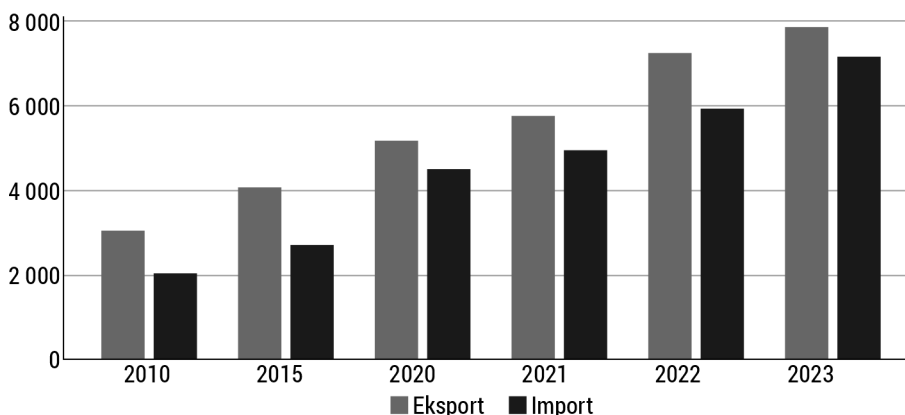
Źródło: [6].

Wartość importu zbóż również rosła, choć znacznie wolniej – w 2010 roku wynosiła 1 043,6 mln zł, a w 2022 osiągnęła poziom 5 291,9 mln zł. Jednak w 2023 roku zaobserwowano wyraźny spadek importu do 3 434,1 mln zł. Mogło to być efektem większej dostępności zbóż na rynku krajowym, ograniczeń importowych z niektórych krajów oraz działań politycznych i regulacyjnych mających na celu zmniejszenie napływu zagranicznych zbóż.

W analizowanym okresie Polska przekształciła się z kraju o względnie zrównoważonym bilansie handlu zbożem w wyraźnego eksportera netto. W 2010 roku różnica między eksportem a importem wynosiła zaledwie 229,3 mln zł, podczas gdy w roku 2023 nadwyżka handlowa osiągnęła imponujące 12 867,6 mln zł. Powyższe dane świadczą o rosnącym znaczeniu Polski jako dostawcy zbóż na rynki międzynarodowe oraz o coraz większej samowystarczalności w zakresie krajowego zapotrzebowania na te produkty.

Rysunek 2 przedstawia wartości importu i eksportu warzyw wyrażone w milionach złotych. W latach 2010–2023 zarówno eksport, jak i import warzyw w Polsce wykazywały tendencję wzrostową, jednak zmieniała się struktura bilansu handlowego – na początku tego okresu dominował eksport, a w jego końcowej części zaobserwowano przewagę importu. W 2010 roku wartość eksportu warzyw z Polski wyniosła 3 032,8 zł, podczas gdy import osiągnął 2 023,9 mln zł, co oznaczało dodatnie

saldo handlowe na poziomie 1 008,9 mln zł. W kolejnych latach eksport stopniowo rósł, osiągając finalnie poziom 7 858,5 mln zł.



Rysunek 2. Import i eksport warzyw wyrażone w milionach złotych (ceny bieżące)

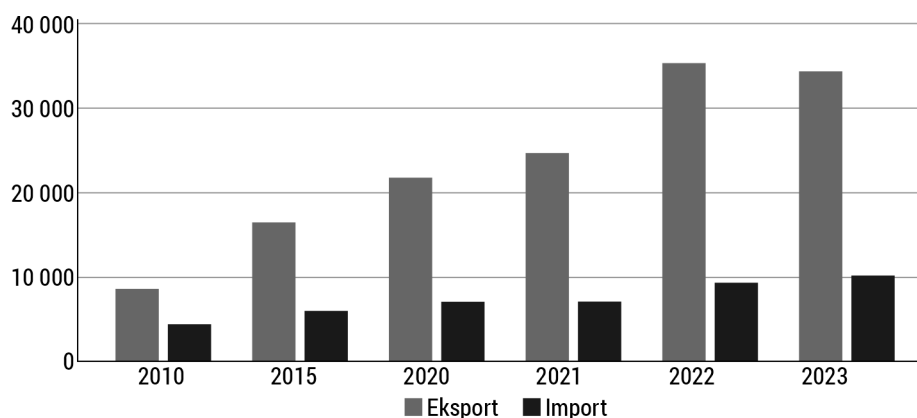
Źródło: [6].

Import warzyw również znacząco wzrósł – z 2 023,9 mln zł w 2010 roku do 7 148,7 mln zł w 2023, co stanowiło wzrost o ponad 3,5 raza. Szczególnie intensywny wzrost importu miał miejsce po 2020 roku. Jego wartość w 2020 wyniosła 4 500,8 mln zł, a już w 2023 osiągnęła 7 148,7 mln zł. Wskazuje to na rosnące uzależnienie Polski od zagranicznych dostaw warzyw, zwłaszcza w ostatnich latach.

W rezultacie tych zmian w strukturze handlu zagranicznego Polska przekształciła się z eksportera netto warzyw w ich importera netto. Od 2021 roku import przeważa nad eksportem, a różnica ta stale się powiększa. W 2023 roku deficyt w handlu warzywami wyniósł już 709,8 mln zł. Taka sytuacja mogła być wynikiem rosnącego popytu na egzotyczne lub sezonowe warzywa, które nie są produkowane w Polsce, wzrostu kosztów krajowej produkcji oraz zmieniających się preferencji konsumentów. Wzrost importu warzyw może prowadzić do wprowadzenia lub zaostrzenia instrumentów ochronnych, tj. ceł, kontyngentów czy dopłat dla krajowych rolników.

Rysunek 3 przedstawia wartości importu i eksportu mięsa i podrobów jadalnych wyrażone w milionach złotych. W latach 2010–2023 Polska znacząco umocniła swoją pozycję jako eksporter netto mięsa i podrobów jadalnych, notując dynamiczny wzrost wartości eksportu. W 2010 roku wyniosła ona 8 539,8 mln zł, a w 2023 osiągnęła 34 361,3 mln zł, co oznacza ponadczterokrotny wzrost. Szczególnie wyraźny skok nastąpił po roku 2020.

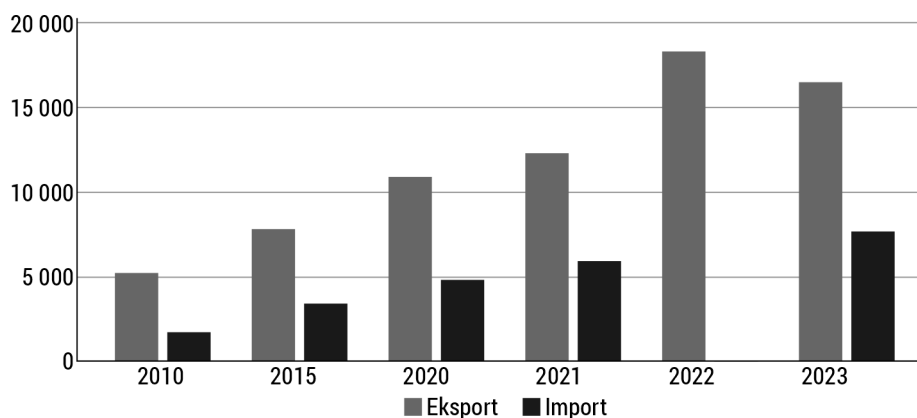
Import mięsa i podrobów jadalnych również wzrastał, jednak w znacznie wolniejszym tempie. W 2010 roku jego wartość wynosiła 4 363,2 mln zł, a w 2023 osiągnęła 10 118,5 mln zł. Ta relatywnie niska dynamika importu w porównaniu do rosnącego eksportu sprawiła, że nadwyżka handlowa Polski w tej dziedzinie systematycznie rosła do 24 242,8 mln zł w 2023 roku.



Rysunek 3. Import i eksport mięsa i podrobów jadalnych wyrażone w milionach złotych (ceny bieżące)

Źródło: [6].

W kontekście protekcjonizmu w rolnictwie, który w sektorze mięsnym przybiera różne formy, wspieranie krajowych producentów poprzez dotacje, regulacje sanitarno-weterynaryjne czy ograniczenia w imporcie produktów z krajów o niższych standardach produkcyjnych może być postrzegane jako sposób na ochronę krajowego rynku oraz zapewnienie bezpieczeństwa żywnościowego.



Rysunek 4. Import i eksport produktów mleczarskich, jaj ptasich, miodu naturalnego i jadalnych produktów pochodzenia zwierzęcego wyrażone w milionach złotych (ceny bieżące)

Źródło: [6].

Rysunek 4 przedstawia wartości importu i eksportu produktów mleczarskich, jaj ptasich, miodu naturalnego i jadalnych produktów pochodzenia zwierzęcego wyrażone w milionach złotych. W latach 2010–2023 Polska systematycznie umocniła swoją pozycję jako eksporter netto we wspomnianej grupie produktów.

W 2023 roku zaobserwowano niewielkie osłabienie wartości eksportu, które spadło do 16 491,5 mln zł, podczas gdy import obniżył się umiarkowanie – do 7 690,5 mln zł. Mimo tego nadwyżka handlowa pozostała na bardzo wysokim poziomie i wyniosła 8 801 mln zł. To potwierdza, że Polska wciąż jest istotnym eksporterem tej grupy produktów, a krajowa produkcja zdecydowanie przewyższa wewnętrzne zapotrzebowanie.

Silna pozycja Polski na międzynarodowym rynku w powyższej kategorii wynika m.in. z rozwiniętej infrastruktury przetwórczej, konkurencyjnych kosztów produkcji oraz wysokiej jakości oferowanych produktów, które cieszą się uznaniem, zwłaszcza w krajach UE, a także na rynkach trzecich.

W kontekście rosnącego znaczenia eksportu i zwiększonej konkurencji ze strony importerów działania, takie jak wsparcie dla lokalnych producentów poprzez dotacje, ograniczenia importu, promocję produktów krajowych czy preferencyjne podejście w zamówieniach publicznych, są postrzegane jako narzędzia ochrony strategicznego sektora rolnictwa. W przypadku produktów mleczarskich i pochodzenia zwierzęcego, których produkcja wiąże się z wysokimi kosztami oraz rygorystycznymi wymaganiami sanitarnymi, protekcyjizm może także pomóc w zapewnieniu stabilności cen i bezpieczeństwa żywnościowego.

5. Podsumowanie

Protekcjonizm rolny odgrywa kluczową rolę we wsparciu małych i średnich gospodarstw rolnych, które często stają wobec trudności w konkurencji cenowej z dużymi producentami spoza UE, na przykład z Ameryki Południowej czy Azji. Dzięki odpowiednio zaprojektowanej polityce celnej gospodarstwa te zyskują możliwość rozwoju, modernizacji i profesjonalizacji swojej działalności. W rezultacie wpływa to na rozwój lokalnych rynków pracy, zwiększenie wartości dodanej w regionie, a także na powstawanie nowych firm związanych z przetwórstwem, logistyką czy agroturystyką.

Warto zaznaczyć, że protekcjonizm rolny wspiera przedsiębiorczość nie tylko poprzez ochronę rynku, ale również poprzez stymulowanie rozwoju nowoczesnego, zrównoważonego rolnictwa, które promuje innowacje, ekologię i wysoką jakość produktów.

Polityka celna UE jest istotnym narzędziem wspierania polskiego rolnictwa. Mechanizmy protekcjonizmu – takie jak cła, kontyngenty czy normy sanitarne – chronią unijny rynek przed destabilizacją i zapewniają przewidywalne warunki działalności gospodarczej.

Dzięki tym działaniom polscy producenci rolni mogą rozwijać działalność, modernizować gospodarstwa i uczestniczyć w rynku międzynarodowym na konkurencyjnych zasadach. Unijna polityka celna sprzyja zatem nie tylko ochronie rynku, ale również rozwojowi lokalnej przedsiębiorczości i wzmocnieniu pozycji Polski w obszarze globalnego handlu rolnego.

Literatura

- [1] Cieřlik, A. (2000). *Nowa teoria handlu zagranicznego w řwietle badań empirycznych*. Wydawnictwo Naukowe PWN.
- [2] Iwaszczuk, N., Orłowska-Puzio, J., Łamasz, B. (2013). *Hedgingowe strategie operacyjne w handlu zagranicznym*. Wydawnictwo AGH.
- [3] Machalica-Drozdek, K. (2019). *Rola cła w rozwoju gospodarczym kraju ze szczególnym uwzględnieniem czasów współczesnych*. Uniwersytet Wrocławski. Wydział Prawa, Administracji i Ekonomii.
- [4] Komisja Europejska. (2020). *Cła*. Dyrekcja Generalna ds. Komunikacji Społecznej.
- [5] Wierzbicka, W., Mergalska, J. (2023). System podatkowy w Polsce, Niemczech i Czechach – analiza porównawcza. *Nauki Ekonomiczne*, 38.
- [6] GUS. (2024). *Rocznik Statystyczny Rolnictwa 2024*.

Nowoczesne technologie w edukacji zawodowej – perspektywa uczniów kierunków elektroniczno-mechatronicznych

Andrzej Polecki¹, Ewa Chodakowska^{2*}

¹ Zespół Szkół Zawodowych nr 2 w Białymstoku

² Międzynarodowa Katedra Logistyki i Inżynierii Usług

Wydział Inżynierii Zarządzania

Politechnika Białostocka

*e.chodakowska@pb.edu.pl

Abstract: Vocational education plays a vital role in preparing specialists to meet the evolving needs of modern industry. The qualifications being developed in vocational schools must be regularly updated to follow rapid industrial and technological progress and to reflect the real expectations of employers. The study reviews domestic and international literature related to the subject of secondary vocational education in the context of modern industry. This article examines the mandatory equipment required in secondary technical schools in the context of future industry challenges. It also presents the results of a survey assessing the technological awareness of students training as electronics and mechatronics technicians. The findings identify specific areas for improvement and provide direction for enhancing the relevance of vocational training. The readiness of secondary technical schools for the challenges posed by the industry of the future was also discussed.

Key words: electronics, mechatronics, vocational education, competences, curriculum, Industry 4.0

1. Wstęp

Zmiany technologiczne związane z czwartą rewolucją przemysłową stawiają nowe wyzwania przed systemami edukacji zawodowej na całym świecie. Transformacja przemysłu wymaga nie tylko zaawansowanych technologii, lecz także przemyślanych strategii wdrażania, które uwzględniają aspekty środowiskowe, społeczne i ekonomiczne. W literaturze podkreśla się konieczność łączenia postępu technologicznego z odpowiedzialnymi politykami rozwoju [1] oraz uwzględniania celów zrównoważonego rozwoju w procesach transformacji przemysłowej [2, 3].

W tym kontekście coraz większego znaczenia nabierają zagadnienia związane z edukacją zawodową, której zadaniem jest nie tylko przygotowanie przyszłych pracowników do funkcjonowania w środowisku Przemysłu Przyszłości (Przemysłu 4.0/5.0), ale także kształtowanie kompetencji umożliwiających odpowiedzialne

i zrównoważone wykorzystanie nowych technologii [4]. Dyskusje naukowe dotyczące kompetencji i oczekiwań pracodawców w stosunku do pracowników najczęściej koncentrują się na kadrze inżynierskiej, podczas gdy pracownicy średniego szczebla również odgrywają bardzo ważną rolę w procesach produkcyjnych przedsiębiorstw. Zmiany związane z czwartą rewolucją przemysłową wymagają od takich pracowników nie tylko poszerzonej wiedzy technicznej, ale także gotowości do pracy w środowiskach zautomatyzowanych, zdigitalizowanych i silnie zintegrowanych informacyjnie. Na tym tle szczególnego znaczenia nabiera analiza stopnia, w jakim programy nauczania i metody dydaktyczne stosowane w szkołach zawodowych odpowiadają na aktualne potrzeby przemysłu i rynku pracy. Konieczne staje się również zbadanie poziomu przygotowania młodzieży do pracy w warunkach nowoczesnej produkcji oraz ocena ich świadomości technologicznej w kontekście Przemysłu Przyszłości.

W literaturze przedmiotu niewiele jest prac naukowych poświęconych średnim szkołom zawodowym kształcącym w poszczególnych branżach, które analizują przygotowanie absolwentów do pracy w nowoczesnym przemyśle. Większość dostępnych opracowań koncentruje się na kompetencjach wymaganych od wyższego personelu technicznego. Przytoczone poniżej wybrane publikacje krajowe i zagraniczne poruszają zagadnienia związane z dostosowaniem systemu edukacji zawodowej do współczesnych realiów technologicznych.

Zawłocki i Niewiadomski podkreślają znaczenie reform w kształceniu i doskonaleniu kadr technicznych w kontekście wyzwań czwartej rewolucji przemysłowej [5]. Zasadzień analizuje stan szkolnictwa zawodowego w Polsce, zwracając uwagę na niedostosowanie kwalifikacji absolwentów do potrzeb rynku pracy, zwłaszcza w regionie śląskim [6, 7]. W szerszym ujęciu Motała i in. wskazują, że w kontekście przemysłu przyszłości istotne są nie tylko umiejętności techniczne, ale również kompetencje miękkie, takie jak komunikacja, zarządzanie projektami czy adaptacyjność [8]. Kwestie związane z cyfryzacją edukacji zawodowej podejmują m.in. Torbacki, który omawia implementację systemów ERP w dydaktyce, oraz Grabowska, analizująca potencjał e-learningu jako formy nauczania w dobie Przemysłu 4.0 [9, 10]. Z kolei Zawłocki i in. omawiają modele kształcenia zawodowego dostosowane do zmieniających się potrzeb rynku [11]. Podobnie Panasiuk i Kaczmarek wskazują na konieczność zapewnienia ciągłości i aktualności edukacji technicznej [12]. Z perspektywy międzynarodowej Chou i in. opisują reformę programów szkolnictwa technicznego na Tajwanie, w której bezpośrednio uwzględniono potrzebę kształcenia kadr dla Przemysłu 4.0 [13]. Akgunduz i Mesutoglu badają rozwój zawodowy nauczycieli szkół technicznych w kontekście edukacji STEM (ang. *science, technology, engineering, mathematics*, czyli nauka, technologia, inżynieria, matematyka) i wyzwań Przemysłu 4.0 [14], natomiast Roll i Ifenthaler analizują wykorzystanie koncepcji Learning Factories 4.0 jako środowisk dydaktycznych wspierających rozwój kompetencji

technicznych i cyfrowych uczniów [15]. Tematykę umiejętności technicznych, ważnych dla Przemysłu 4.0, w szkołach średnich zawodowych podejmują również w swojej pracy Yanuardi i in. [16].

W kontekście rosnących wymagań nowoczesnego przemysłu uzasadnione jest zbadanie poziomu przygotowania uczniów szkół technicznych do pracy w warunkach zautomatyzowanej i cyfrowej produkcji. Celem niniejszej pracy jest ocena świadomości technologicznej uczniów średnich szkół zawodowych kształcących się w zawodach z branży elektroniczno-mechatronicznej (ELM) w odniesieniu do koncepcji Przemysłu Przyszłości. Badanie miało na celu określenie poziomu przygotowania młodzieży do pracy w zautomatyzowanych środowiskach produkcyjnych poprzez ocenę znajomości kluczowych pojęć i technologii związanych z Przemysłem Przyszłości. Część wyników badań dotyczących świadomości technologicznej uczniów kierunków ELM została wcześniej opublikowana w pracy Chodakowskiej i Poleckiego [17], w ramach konferencji Intelligent Systems in Production Engineering and Maintenance, ISPEM 2025. Wstępem do badań była ocena wybranych podstaw programowych pod kątem obecności treści związanych z Przemysłem 4.0/5.0 i obowiązkowego wyposażenia technicznego. Na tej podstawie sformułowano wnioski i rekomendacje dotyczące edukacji zawodowej, obejmujące m.in. potrzebę aktualizacji treści kształcenia, rozwój kompetencji cyfrowych i miękkich oraz wzmocnienie współpracy szkół z otoczeniem przemysłowym. Uzyskane wyniki mogą stanowić materiał wyjściowy do dalszych prac nad modernizacją systemu kształcenia zawodowego.

2. Treści Przemysłu Przyszłości w podstawach programowych zawodów z branży ELM

2.1. Podstawy programowe zawodów z branży ELM

Reforma szkolnictwa zawodowego w 2019 roku wprowadziła nowe podstawy programowe dla poszczególnych zawodów, w których wyodrębniono po dwie kwalifikacje w ramach danego zawodu, a także określono cele i efekty kształcenia wraz z kryteriami weryfikacji. W tabeli 1 przedstawiono kwalifikacje występujące w analizowanych zawodach z branży ELM (technik mechatronik, technik elektronik, technik automatyk, technik robotyk).

Zapisy efektów kształcenia oraz kryteriów ich weryfikacji są ujęte dość ogólnikowo i trudno jednoznacznie powiązać je z treściami charakterystycznymi dla koncepcji Przemysłu Przyszłości. Wszystkie podstawy programowe zawierają zagadnienia dotyczące bezpieczeństwa i higieny pracy, języka obcego zawodowego oraz kompetencji personalnych i społecznych. W zależności od zawodu uwzględniają również podstawy elektroniki, mechatroniki, automatyki lub robotyki, a także zagadnienia związane z instalacją, eksploatacją i diagnostyką różnych systemów technicznych. Dopiero programy autorskie opracowywane przez nauczycieli, które

uszczegóławiają efekty kształcenia oraz kryteria ich weryfikacji, mogą zawierać treści bezpośrednio odnoszące się do Przemysłu 4.0/5.0, szerzej określanego mianem Przemysłu Przyszłości.

Tabela 1. Kwalifikacje w poszczególnych zawodach z branży ELM w technikum

Zawód	Kwalifikacje wyodrębnione w zawodzie
Technik mechatronik	ELM.03. Montaż, uruchamianie i konserwacja urządzeń i systemów mechatronicznych
	ELM.06. Eksploatacja i programowanie urządzeń i systemów mechatronicznych
Technik elektronik	ELM.02. Montaż oraz instalowanie układów i urządzeń elektronicznych
	ELM.05. Eksploatacja urządzeń elektronicznych
Technik automatyk	ELM.01. Montaż, uruchamianie i obsługiwanie układów automatyki przemysłowej
	ELM.04. Eksploatacja układów automatyki przemysłowej
Technik robotyk	ELM.07. Montaż, uruchamianie i obsługa systemów robotyki
	ELM.08. Eksploatacja i programowanie systemów robotyki

Źródło: opracowanie własne na podstawie [18, 19].

2.2. Wyposażenie dydaktyczne dla zawodów ELM związane z nowoczesnym przemysłem

Szkoła prowadząca kształcenie w danym zawodzie musi zapewnić odpowiednie wyposażenie pracowni, laboratoriów i warsztatów szkolnych w materiały dydaktyczne, maszyny i urządzenia, wraz ze specjalistycznym oprogramowaniem. W warunkach realizacji kształcenia w danym zawodzie, które ujęte są w podstawie programowej, można znaleźć wyraźne nawiązanie do nowoczesnego przemysłu.

Wspólne wyposażenie niezbędne w pracowniach do poszczególnych zawodów ELM stanowią m.in. [18, 19]:

- stanowisko komputerowe dla nauczyciela z urządzeniem wielofunkcyjnym, projektorem, tablicą lub monitorem interaktywnym;
- stanowiska komputerowe dla uczniów z programem typu CAD (ang. *computer-aided design*);
- stanowiska ze sterownikami PLC (ang. *programmable logic controller*) do nauki programowania i diagnostyki;
- symulatory procesów przemysłowych.

Obowiązkowe dla kształcenia w zawodzie technik mechatronik są m.in. [18]:

- zestawy z treningowymi układami sterowania urządzeń mechatronicznych;
- oprogramowanie do pomiarów, symulacji i programowania systemów mechatronicznych;
- stanowiska pomiarowe do diagnostyki i oceny stanu urządzeń, w tym czujników, sygnalizatorów, regulatorów i urządzeń energoelektronicznych.

Niezbędne wyposażenie stanowisk w zawodzie technik elektronik to na przykład [18]:

- trenażery z układami elektrycznymi i elektronicznymi do pomiarów parametrów;
- stanowiska komputerowe do dokumentowania oraz umożliwiające symulację układów elektrycznych i elektronicznych;
- sprzęt instalacyjny i diagnostyczny systemów RTV, CCTV i sieci (kamery, rejestratory, routery, anteny, tunery itp.);
- testery sygnałów DVB i LAN;
- generatory, zadajniki, oscyloskopy, analizatory sygnałów, przyrządy pomiarowe;
- elementy systemów inteligentnego budynku: czytniki RFID, biometryczne, czujniki i sterowniki.

Wymagane elementy wyposażenia dydaktycznego w kształceniu technika automatyka to m.in. [18]:

- stanowiska komputerowe z oprogramowaniem do symulacji i rejestracji pracy układów elektrycznych i elektronicznych;
- stanowiska do analizy parametrów procesów technologicznych;
- komunikatory lub modemy z protokołami przemysłowymi oraz przetworniki parametrów fizycznych;
- modele układów automatyki przemysłowej;
- model linii technologicznej z transportem i segregacją, robot mobilny, manipulator, trenażery z przekąźnikami i układami stykowymi.

W przypadku zawodu technik robotyk niezbędne elementy wyposażenia stanowią na przykład [19]:

- różne typy czujników: położenia, ruchu, temperatury, ciśnienia, siły, zbliżenia, ugięcia, przechyłu itp.;
- oprogramowanie CAM (ang. *computer-aided manufacturing*) do programowania maszyn CNC i systemów robotyki;
- stanowiska z robotami lub cobotami i kontrolerami do uruchamiania i integracji z układami technologicznymi (np. transport, spawanie, paletyzacja);
- stanowiska do programowania, testowania i diagnostyki systemów robotyki i sieci komunikacyjnych;
- oprogramowanie do symulacji i testowania programów offline.

W tabeli 2 przedstawiono zestawienie elementów wyposażenia pracowni, laboratoriów i warsztatów szkolnych charakterystycznych dla zawodów z branży ELM, wraz z ich powiązaniem z technologiami nowoczesnego przemysłu.

Tabela 2. Wybrane elementy niezbędnego wyposażenia szkół i odpowiadające im pojęcia związane z Przemysłem Przyszłości

Elementy wyposażenia szkół	Technologie Przemysłu 4.0
trenażery z układami elektrycznymi i elektronicznymi	symulatory
stanowiska komputerowe dla uczniów umożliwiające obserwację i analizę zależności między właściwościami mediów wykorzystywanych w procesie technologicznym	internet rzeczy
stanowisko komputerowe dla uczniów podłączone do sieci lokalnej z dostępem do internetu	platformy e-learningowe
stanowiska umożliwiające archiwizację i testowanie urządzeń i systemów robotyki oraz sieci komunikacyjnych, z jednoczesną możliwością wykonywania zadań diagnostycznych i eksploatacyjnych	wirtualne bliźniaki
stanowiska robotów lub cobotów z kontrolerami i oprogramowaniem	roboty przemysłowe roboty współpracujące
stanowiska z instalacjami zawierającymi sterowniki PLC	sterowniki PLC
oprogramowanie do obróbki i archiwizacji wyników pomiarów	blockchain
stanowiska umożliwiające programowanie, modyfikację, archiwizację i testowanie urządzeń i systemów robotyki oraz sieci komunikacyjnych, z jednoczesną możliwością wykonywania zadań diagnostycznych i eksploatacyjnych	systemy cyberfizyczne

Źródło: opracowanie własne na podstawie [18, 19].

Przedstawione w niniejszym artykule zestawienie wyposażenia pracowni szkolnych wskazuje, że wiele elementów infrastruktury dydaktycznej pozostaje w bezpośrednim związku z technologiami Przemysłu 4.0. Obecność nowoczesnych narzędzi, takich jak sterowniki PLC, roboty współpracujące, stanowiska do symulacji procesów czy oprogramowanie CAD/CAM, sugeruje, że uczniowie powinni być zaznajomieni z kluczowymi rozwiązaniami wykorzystywanymi we współczesnym przemyśle. W celu weryfikacji tego założenia przeprowadzono badania ankietowe, mające na celu ocenę poziomu świadomości technologicznej młodzieży kształcącej się w zawodach z branży ELM.

3. Wyniki badań kwestionariuszowych

3.1. Metodyka badania

Na potrzeby badania opracowano kwestionariusz ankiety w MS Forms, skierowany do uczniów siedmiu szkół z województwa podlaskiego kształcących się w branży ELM. Ankieta pt. *Kształcenie zawodowe a Przemysł Przyszłości* składała się z metryczki oraz sześciu pytań zamkniętych z możliwością wyboru opcji dotyczących nowoczesnych technologii, a także jednego pytania otwartego dotyczącego propozycji ewentualnych zmian w procesie nauczania.

Badanie przeprowadzono w 2024 roku. Łącznie uzyskano 482 wypełnione kwestionariusze, co stanowi 44,5% ogólnej liczby uczniów uczących się w tych zawodach w województwie podlaskim (tj. 1083 uczniów). Badaniem objęto uczniów z następujących szkół technicznych (w nawiasie podano liczbę uczniów kształcących się w branży ELM w danej szkole):

- Zespół Szkół Zawodowych nr 2 w Białymstoku (231),
- Zespół Szkół Mechanicznych w Białymstoku (192),
- Zespół Szkół Elektrycznych w Białymstoku (129),
- Centrum Kształcenia Zawodowego w Wysokiem Mazowieckiem (74),
- Zespół Szkół Technicznych w Suwałkach (237),
- Augustowskie Centrum Edukacyjne w Augustowie (74),
- Zespół Szkół Mechanicznych i Ogólnokształcących nr 5 w Łomży (146).

W tabeli 3 zaprezentowano szczegółowe dane dotyczące respondentów.

Tabela 3. Liczba respondentów z podziałem na klasy i zawody

Zawód	Klasa			Suma		
	I	II	III	IV	V	
Technik automatyk	6	6	7	18	6	43
Technik elektronik	13	24	24	17	12	90
Technik mechatronik	40	73	99	57	37	306
Technik robotyk	11	20	12			43
Suma	70	123	142	92	55	482

Źródło: opracowanie własne.

Największą grupę respondentów stanowili uczniowie kształcący się w zawodzie technik mechatronik – 306 osób, co stanowiło 63,5% wszystkich uczestników badania. Drugą najliczniejszą grupą byli uczniowie kierunku technik elektronik (90 osób, czyli 18,7%). Z kolei zawody technik automatyk i technik robotyk reprezentowało po 43 uczniów (po 8,9% każda grupa).

Najliczniejszą grupę stanowili uczniowie klasy trzeciej (142 osoby), na drugim miejscu znaleźli się uczniowie klas drugich (123 osoby), a następnie czwartych (92 osoby). Klasy pierwsze i piąte reprezentowało odpowiednio 70 i 55 uczniów. Brak respondentów kierunku technik robotyk w wyższych klasach wynika z faktu, że zawód ten został wprowadzony do systemu edukacji dopiero w roku szkolnym 2021/2022.

3.2. Wyniki badań

W ramach badania uczniowie zostali poproszeni o wskazanie, czy mają możliwość pracy z nowoczesnymi technologiami, takimi jak roboty przemysłowe, sterowniki PLC oraz rzeczywistość rozszerzona (AR) lub wirtualna (VR). W tabeli 4 przedstawiono liczbę odpowiedzi twierdzących według poziomu (klasy).

Tabela 4. Odsetek uczniów w poszczególnych klasach deklarujących możliwość pracy z nowoczesnymi technologiami

Uczniowie klasy:	Odpowiedzi twierdzące		
	Roboty przemysłowe	Sterowniki PLC	AR/VR
pierwszej	21%	20%	27%
drugiej	23%	20%	17%
trzeciej	24%	80%	13%
czwartej	22%	78%	14%
piątej	23%	78%	20%

Źródło: opracowanie własne.

Najwięcej uczniów wskazało sterowniki PLC jako technologię, z którą mają styczność – szczególnie wyróżniają się tu uczniowie klas trzecich (80%) oraz czwartych (78%) i piątych (78%). Świadczy to o obecności tej tematyki w programach nauczania. W przypadku robotów przemysłowych liczba odpowiedzi twierdzących utrzymuje się na zbliżonym poziomie we wszystkich klasach, bez wyraźnej dominacji żadnej z nich, co może sugerować mniejsze zaakcentowanie tego obszaru techniki w procesie kształcenia. Z kolei rzeczywistość rozszerzona i wirtualna (AR/VR) były wskazywane najczęściej przez uczniów klas pierwszych (27%), a także stosunkowo często klas drugich (17%), co może wynikać z większego zainteresowania tymi zagadnieniami wśród młodszych roczników. Wyniki dotyczące możliwości pracy z nowoczesnymi technologiami w rozbiciu na poszczególne zawody przedstawiono w tabeli 5.

Tabela 5. Deklaracje uczniów dotyczące możliwości pracy z nowoczesnymi technologiami w podziale na zawody

Zawód:	Odpowiedzi twierdzące		
	Roboty przemysłowe	Sterowniki PLC	AR/VR
technik mechatronik	20%	64%	17%
technik elektroniki	8%	24%	10%
technik automatyk	46%	72%	11%
technik robotyk	53%	37%	35%

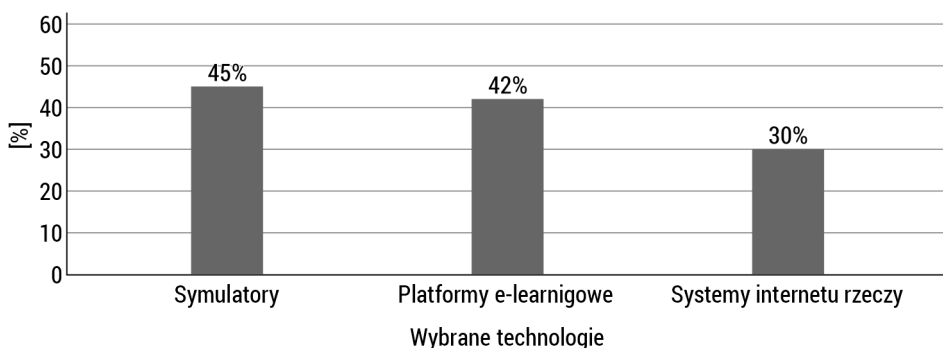
Źródło: opracowanie własne.

Zestawienie wyników wskazuje, że to uczniowie kształcący się w zawodach technik automatyk i technik mechatronik najczęściej deklarują możliwość pracy z nowoczesnymi technologiami. Szczególnie wyraźnie widoczne jest to w przypadku sterowników PLC – aż 72% automatyków i 64% mechatroników potwierdziło, że ma styczność z tą technologią w toku swojej edukacji, co świadczy o tym, iż zagadnienia dotyczące wspomnianych sterowników są często omawiane podczas zajęć. W grupie przyszłych techników robotyków 37% uczniów potwierdziło kontakt z technologiami PLC, co, biorąc pod uwagę, że są to uczniowie klas początkowych, może sugerować istotne znaczenie tej dziedziny w edukacji przyszłych robotyków. W obszarze robotów przemysłowych podobne wyniki uzyskano w przypadku zawodów technik automatyk i technik robotyk, z odpowiedziami twierdzącymi na poziomie odpowiednio 46% i 53%, co podkreśla znaczenie tej technologii w przygotowywaniu przyszłych specjalistów do pracy w środowisku zautomatyzowanych systemów produkcyjnych. Choć rzeczywistość rozszerzona (AR) i wirtualna (VR) są mniej powszechne niż PLC i roboty przemysłowe, także i tutaj najwięcej uczniów – 35% – wskazało na możliwość pracy z tymi technologiami właśnie w procesie kształcenia w zawodzie technika robotyka. Technicy automatyki natomiast rzadko, bo tylko w 11%, deklarują dostęp do AR/VR. Uczniowie kierunku technik elektroniki również znacznie rzadziej deklarowali możliwość kontaktu z analizowanymi technologiami. Elektrycy wskazali natomiast pewną obecność PLC (24% badanych) i AR/VR (10%) w dotyczącym ich programie nauczania.

Kwestionariusz ankiety obejmował pytanie także o stosowanie nowoczesnych technologii podczas zajęć. W odpowiedzi na to pytanie uczniowie najczęściej wskazywali symulatory – tę opcję zaznaczyło 45% ankietowanych, co może świadczyć o tym, że uczniowie pracują na różnego typu trenażerach podczas zajęć zawodowych. Na drugim miejscu znalazły się platformy e-learningowe, z których korzystanie potwierdziło 42% uczniów. Systemy internetu rzeczy (IoT) wskazało natomiast 30% respondentów, a to świadczy o ich rosnącej, lecz wciąż ograniczonej obecności w programach nauczania. Dane procentowe zaprezentowano na rysunku 1.

Wśród uczniów kształcących się w branży ELM przeprowadzono również badanie dotyczące znajomości znaczenia wybranych pojęć technologicznych. Respondenci zostali

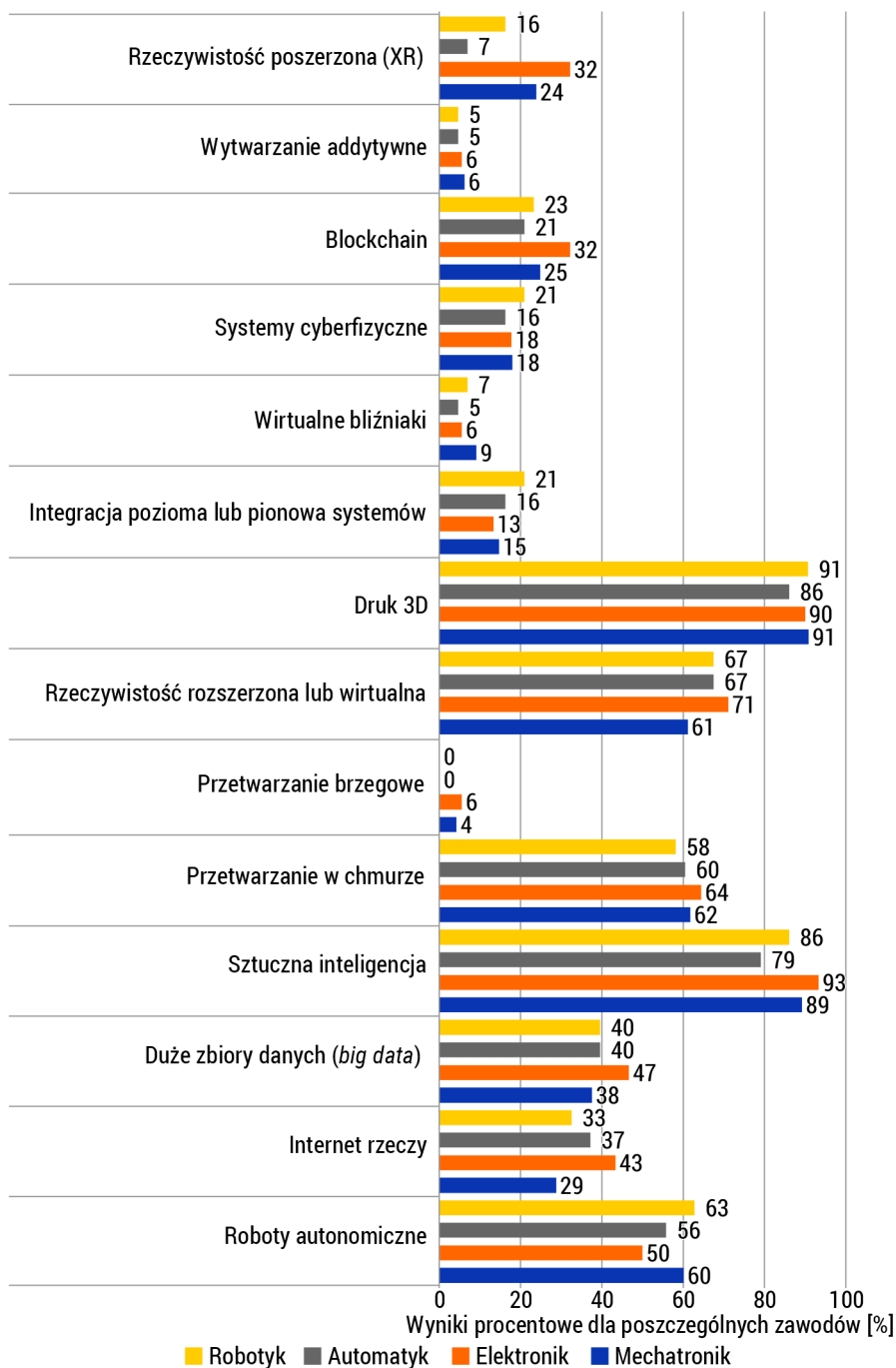
poproszeni o wskazanie, które z terminów są im znane. Wyniki pokazały zróżnicowany poziom wiedzy – od bardzo dobrej znajomości takich terminów jak „druk 3D” czy „sztuczna inteligencja”, po niską rozpoznawalność pojęć bardziej specjalistycznych, takich jak „wytwarzanie addytywne”, „przetwarzanie brzegowe” czy „wirtualne bliźniaki”. Wyniki przedstawione na rysunku 2 wskazują na podobny poziom rozpoznawalności poszczególnych pojęć przez ankietowanych, niezależnie od kierunku kształcenia. Uczniowie kształcący się w zawodach związanych z mechatroniką i elektroniką wykazali nieco lepszą znajomość terminów takich jak „rzeczywistość rozszerzona lub wirtualna” czy „block-chain”.



Rysunek 1. Odsetek uczniów deklarujących wykorzystanie poszczególnych nowoczesnych technologii na zajęciach

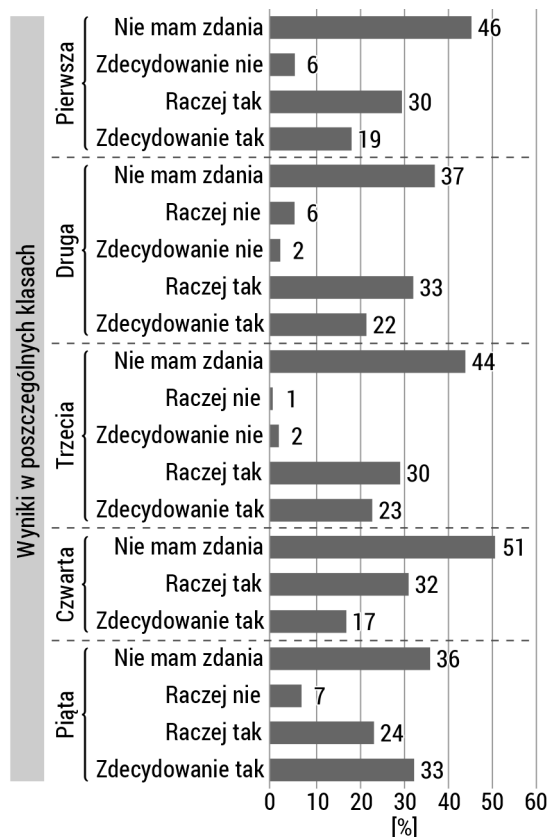
Źródło: opracowanie własne.

W kontekście kształcenia zawodowego uczniów istotne jest zrozumienie, w jakim stopniu są oni świadomi istotności kompetencji związanych z nowoczesnym przemysłem. Odpowiedzi uczniów na pytanie o znaczenie tych kompetencji w kontekście przyszłej kariery zawodowej pokazują, że temat umiejętności związanych z nowoczesnym przemysłem (takim jak Przemysł 4.0 czy 5.0) wciąż pozostaje dla wielu nie do końca zrozumiały – duży odsetek uczniów we wszystkich klasach zaznaczył odpowiedź „nie mam zdania”. Najwięcej takich odpowiedzi pojawiło się w klasie czwartej, a najmniej w piątej. Mimo tego widoczna jest wyraźna tendencja: im starsi uczniowie, tym większe znaczenie przypisują omawianym kompetencjom. W klasie piątej ponad 56% uczniów uważa, że są one ważne (przeważające odpowiedzi „raczej tak” i „zdecydowanie tak”), co może wynikać z ich większej świadomości zawodowej i zbliżającego się momentu wejścia na rynek pracy. Negatywne odpowiedzi, czyli „raczej nie” i „zdecydowanie nie”, pojawiały się rzadko i stanowiły niewielki odsetek w każdej grupie. Procentowy rozkład odpowiedzi uczniów na pytanie o znaczenie kompetencji związanych z nowoczesnym przemysłem dla ich przyszłej kariery zawodowej przedstawiono na rysunku 3.



Rysunek 2. Znajomość terminologii technologicznej wśród uczniów – dane procentowe

Źródło: opracowanie własne.



Rysunek 3. Procentowy rozkład odpowiedzi uczniów na pytanie o znaczenie kompetencji związanych z nowoczesnym przemysłem (4.0/5.0/Przemysłem Przyszłości) dla ich przyszłej kariery zawodowej

Źródło: opracowanie własne.

Współczesny rynek pracy, szczególnie w kontekście Przemysłu 4.0 i 5.0, stawia przed uczniami nowe wyzwania i oczekiwania. W związku z tym coraz częściej pojawia się pytanie, które kompetencje powinny być priorytetowo rozwijane w procesie kształcenia. Wyniki badania pokazują, że uczniowie postrzegają kompetencje twarde jako najważniejsze w kontekście swojej przyszłości zawodowej – aż 65% respondentów wskazało je jako priorytetowe. Oznacza to, że w procesie kształcenia szczególny nacisk położony jest na rozwój umiejętności technicznych i specjalistycznych, takich jak obsługa nowoczesnych technologii, programowanie, analiza danych czy praca w środowiskach CAD. To właśnie te kompetencje uczniowie najczęściej wiążą z realnym zwiększeniem swoich szans na rynku pracy. Jednocześnie 35% badanych podkreśla znaczenie kompetencji miękkich, które są nieodłącznym elementem efektywnego funkcjonowania w zespole, umiejętności adaptacji do zmian czy radzenia sobie ze stresem i wyzwaniami dnia codziennego. Ich rola w edukacji zdecydowanie

nie powinna być marginalizowana – wręcz przeciwnie, powinny one być rozwijane równoległe z kompetencjami twardymi.

Uczniowie, biorąc udział w badaniu, mieli możliwość wyrażenia swoich opinii dotyczących ewentualnych zmian w programie nauczania, dzięki którym mogliby lepiej przygotować się do pracy w nowoczesnym przemyśle. Na pytanie otwarte: „Co byś zmienił w programie nauczania, aby był on bardziej zgodny z technologiami nowoczesnego przemysłu?” otrzymano 132 odpowiedzi. Zdecydowana większość uczniów zwróciła uwagę na konieczność zwiększenia liczby zajęć praktycznych, częstsze wykorzystywanie maszyn i urządzeń podczas zajęć oraz ograniczenie treści nauczania z przedmiotów ogólnokształcących, takich jak biologia i geografia, czego przykładem jest odpowiedź jednego z uczniów: „Wprowadziłbym więcej zajęć praktycznych z AI, IoT, aby uczniowie zdobywali realne umiejętności potrzebne w Przemysle 4.0 i 5.0. Skupiłbym się na nauce programowania, analizy danych i pracy z robotyką, a także rozwoju kompetencji miękkich, takich jak współpraca w zespołach interdyscyplinarnych i adaptacja do szybkich zmian technologicznych”.

4. Wnioski i podsumowanie

Wyniki badania ankietowego wskazują, że uczniowie szkół zawodowych mają zróżnicowaną wiedzę dotyczącą kluczowych terminów związanych z technologiami Przemysłu 4.0. Jednocześnie oczekują zwiększenia liczby zajęć praktycznych oraz częstszego wykorzystywania nowoczesnych maszyn, urządzeń i aktualnego oprogramowania w trakcie nauki. Wiele szkół posiada nowoczesne wyposażenie, jednak jego potencjał nie jest w pełni wykorzystywany.

Jednym z kluczowych rozwiązań może być upowszechnienie modułowego systemu kształcenia, który umożliwiłby większą elastyczność programową. Modułowe programy nauczania pozwalają na łatwiejsze dostosowanie treści edukacyjnych do zmieniających się wymagań pracodawców i lokalnych uwarunkowań gospodarczych. Kształcenie modułowe sprzyja także aktywizacji uczniów i umożliwia im skuteczniejsze przyswajanie wiedzy.

Kolejnym istotnym krokiem jest rozwój klas patronackich i wdrażanie dualnego systemu kształcenia, który opiera się na współpracy szkół z przedsiębiorstwami. Takie partnerstwo pozwala na naukę zarówno w szkole, jak i w rzeczywistym środowisku pracy, gdzie uczniowie mogą korzystać z nowoczesnych technologii i poznawać rzeczywiste warunki funkcjonowania zakładów. Uczniowie, poza zdobywaniem wiedzy teoretycznej, rozwijają również kompetencje praktyczne, organizacyjne i interpersonalne – tak ważne w kontekście wymagań współczesnego rynku pracy.

Dualny system kształcenia, aby mógł funkcjonować efektywnie, wymaga zaangażowania różnych podmiotów – państwa, pracodawców i związków zawodowych – oraz odpowiedniego przygotowania nauczycieli i opiekunów praktyk. System ten powinien bazować na trzech filarach: solidnym przygotowaniu teoretycznym, nauce praktycznej oraz rozwijaniu kompetencji społecznych, takich jak znajomość relacji

w środowisku pracy, organizacja stanowisk i przestrzeganie zasad dyscypliny. Pracodawcy podkreślają, że umiejętności interpersonalne są równie ważne jak przygotowanie zawodowe, co wskazuje na potrzebę ich systemowego rozwijania w ramach programów kształcenia [20–22].

Odpowiedzią na wyzwania związane z cyfryzacją, automatyzacją i wdrażaniem technologii Przemysłu 4.0/5.0 powinny być aktualizacja programów nauczania, inwestycja w laboratoria i nowoczesne pracownie, szkolenia kadry dydaktycznej oraz rozwijanie kompetencji cyfrowych uczniów, m.in. poprzez wykorzystanie sztucznej inteligencji w procesie nauki.

Szkoły zawodowe powinny również aktywnie uczestniczyć w projektach wspieranych przez fundusze unijne, takich jak Erasmus+ czy programy regionalne umożliwiające organizację praktyk zagranicznych, wymianę doświadczeń oraz tworzenie Centrów Kształcenia Zawodowego i Branżowych Centrów Umiejętności. W szczególności dotyczy to zawodów z branży ELM, która stanowi podstawę gospodarki opartej na zaawansowanych technologiach.

Przykładem dobrych praktyk w rozwoju infrastruktury technicznej szkół zawodowych w województwie podlaskim jest realizowany w latach 2025–2027 projekt pt. „Smart Education for Industry 4.0 – Wzrost jakości kształcenia zawodowego na rzecz branży metalowo-maszynowej”. Głównym celem projektu jest podniesienie jakości kształcenia zawodowego poprzez wyposażenie szkół w nowoczesne technologie i pracownie związane z Przemysłem 4.0. Projekt obejmuje wsparcie finansowe w wysokości ponad 20 milionów złotych dla ośmiu szkół z województwa podlaskiego, kształcących m.in. w zawodach: technik automatyk, technik mechatronik i technik robotyk [23].

Podsumowując, należy stwierdzić, że liczne działania podejmowane na rzecz poprawy jakości edukacji zawodowej w technikach na kierunkach ELM w warunkach nowoczesnego przemysłu wciąż pozostają niewystarczające, a ich wdrożenie stanowi poważne wyzwanie dla wszystkich podmiotów zaangażowanych w proces kształcenia w dobie zmian pokoleniowych.

Literatura

- [1] Szum, K., Nazarko, J. (2020). Exploring the determinants of Industry 4.0 development using an extended SWOT analysis: A regional study. *Energies*, 13(22), 5972. <https://doi.org/10.3390/en13225972>
- [2] Chodakowska, E., Nazarko, J. (2020). Assessing the performance of sustainable development goals of EU countries: Hard and soft data integration. *Energies*, 13(13), 3439. <https://doi.org/10.3390/en13133439>
- [3] Chodakowska, E., Nazarko, J., Nazarko, Ł. (2025). Efficiency of renewable energy potential utilization in European Union: Towards responsible net-zero policy. *Energies*, 18, 1175. <https://doi.org/10.3390/en18051175>

- [4] Lupi, F., Mabkhot, M. M., Finžgar, M., Minetola, P., Stadnicka, D., Maffei, A., Litwin, P., Boffa, E., Ferreira, P., Podrżaj, P., Chelli, R., Lohse, N., Lanzetta, M. (2022). Toward a sustainable educational engineer archetype through Industry 4.0. *Computers in Industry*, 134, 103543. <https://doi.org/10.1016/j.compind.2021.103543>
- [5] Zawłocki, I., Niewiadomski, K. (2017). Kształcenie i doskonalenie kadr pracowniczych w dobie czwartej rewolucji przemysłowej. *Edukacja – Technika – Informatyka*, 3(21). <https://doi.org/10.15584/eti.2017.3.16>
- [6] Zasadzień, M. (2022). Education at technical secondary schools for the needs of Industry 4.0 in Poland with particular consideration of the Śląskie voivodship. *Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej. Seria Organizacja i Zarządzanie*, 161. <https://doi.org/10.29119/1641-3466.2022.161.23>
- [7] Zasadzień, M. (2023). Analysis of qualifications in vocational secondary schools in the aspects of Industry 4.0 development. *Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej. Seria Organizacja i Zarządzanie*, 174. <https://doi.org/10.29119/1641-3466.2023.174.31>
- [8] Motała, D., Chochołowska, N., Zarówna, W. (2024). Technical only? The importance of selected competences of managers and engineers in Industry 4.0. *Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej. Seria Organizacja i Zarządzanie*, 200. <https://doi.org/10.29119/1641-3466.2024.200.22>
- [9] Torbacki, W. (2019). Wykorzystanie systemów ERP w dydaktyce szkół wyższych w dobie koncepcji Przemysł 4.0 i Logistyka 4.0. *Autobusy. Technika, Eksploatacja, Systemy Transportowe*, 1–2.
- [10] Grabowska, S. (2018). E-learning jako pożądana forma kształcenia w dobie Industry 4.0. *Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej Seria: Organizacja i Zarządzanie*, 118.
- [11] Zawłocki, I., Nieroba, E., Niewiadomski, K. (2015). Preferowane modele kształcenia zawodowego w średnim i wyższym szkolnictwie w Polsce. *Edukacja – Technika – Informatyka*, 1(11).
- [12] Panasiuk, J., Kaczmarek, W. (2018). Zapewnienie ciągłości edukacji technicznej w kontekście wymagań Przemysłu 4.0. *Napędy i Sterowanie*, 6.
- [13] Chou, C.-M., Shen, C.-H., Hsiao, H.-C., Shen, T.-C. (2018). Industry 4.0 manpower and its teaching connotation in technical and vocational education: Adjust 107 curriculum reform. *International Journal of Psychology and Educational Studies*, 5(1), 9–14. <https://doi.org/10.17220/ijpes.2018.01.002>
- [14] Akgunduz, D., Mesutoglu, C. (2021). Science, technology, engineering, and mathematics education for Industry 4.0 in technical and vocational high schools: Investigation of teacher professional development. *Science Education International*, 32(2), 172–181. <https://doi.org/10.33828/sei.v32.i2.11>
- [15] Roll, M., Ifenthaler, D. (2021). Learning Factories 4.0 in technical vocational schools: can they foster competence development? *Empirical Research*

- in *Vocational Education and Training*, 13(20). <https://doi.org/10.1186/s40461-021-00124-0>
- [16] Yanuardi, R., Widiaty, I., Komaro, M. (2022). Vocational high school technical skills facing the Industrial Era 4.0. *Advances in Social Science, Education and Humanities Research*, 651. <https://doi.org/10.2991/assehr.k.220305.006>
 - [17] Chodakowska, E., Polecki, A. (2025). Electronics and mechatronics education for the industry of the future – Insights from secondary vocational education in Poland. In A. Burduk, J. Świder (Eds.), *Intelligent systems in production engineering and maintenance IV* (Vol. 1, pp. 104–118), *Mechanical Engineering*. Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-031-99159-2_8
 - [18] Ministerstwo Edukacji i Nauki. (2019). Rozporządzenie MEN z dnia 16 maja 2019 r. w sprawie podstaw programowych kształcenia w zawodach szkolnictwa branżowego oraz dodatkowych umiejętności zawodowych w zakresie wybranych zawodów szkolnictwa branżowego, Dz.U. z 2019, poz. 991. <https://isap.sejm.gov.pl/isap.nsf/DocDetails.xsp?id=WDU20190000991>
 - [19] Ministerstwo Edukacji i Nauki. (2021). Rozporządzenie MEN z dnia 28 maja 2021 r. zmieniające rozporządzenie w sprawie podstaw programowych kształcenia w zawodach szkolnictwa branżowego oraz dodatkowych umiejętności zawodowych w zakresie wybranych zawodów szkolnictwa branżowego, Dz.U. 2021, poz. 1087. <https://isap.sejm.gov.pl/isap.nsf/DocDetails.xsp?id=WDU20210001087>
 - [20] Turek, D. (2019). Kompetencje poszukiwane przez pracodawców – wyniki badań jakościowych. *Zeszyty Naukowe Uniwersytetu Ekonomicznego w Krakowie*, 4(982). <https://doi.org/10.15678/ZNUEK.2019.0982.0404>
 - [21] World Economic Forum. (2025). *The future of jobs report 2025*. <https://www.weforum.org/publications/the-future-of-jobs-report-2025>
 - [22] International Labour Organization. (2025). *World employment and social outlook: Trends 2025*. International Labour Office. <https://www.ilo.org/publications/flagship-reports/world-employment-and-social-outlook-trends-2025>
 - [23] Evoluma. (n.d.) *Rusza projekt Smart Education for Industry 4.0 o wartości ponad 20 mln zł!* Retrieved August 10, 2025, from: <https://evoluma.pl/news/rusza-projekt-smart-education-industry-40-o-wartosci-ponad-20-mln-zl>

Wdrażanie Celów Zrównoważonego Rozwoju w strategiach polskich uczelni wyższych

Agnieszka Sakowicz

Katedra Marketingu i Turystyki

Wydział Inżynierii Zarządzania

Politechnika Białostocka

a.sakowicz@pb.edu.pl

Abstract: In today's world, sustainable development is becoming an essential element of activities carried out by universities. Research on how universities contribute to sustainability is gaining increasing attention. One of the key tools that help universities work toward sustainability are their strategic plans. This article focuses on the critical role that universities play in embedding SDGs into their strategic plans. The aim of this research is to explore how Polish public universities are integrating sustainable development into their long-term strategies. This study used a qualitative method, analyzing the content of 103 strategic documents from public universities across the country. The goal was to see how many of these plans explicitly refer to the SDGs. The results reveal that while some progress has been made, the approach to SDGs in university strategies remains quite selective and limited. This raises important questions about why certain goals are prioritized while others are overlooked. One possible reason might be that universities are not fully aware of how the different SDGs connect to their broader mission, or they may lack a deeper understanding of the complexity behind these goals. These findings point to the need for further research and reflection on how higher education can better embrace its role in driving sustainable development in a more comprehensive and integrated way.

Key words: Sustainable Development Goals, SDG, university, sustainable development, university strategy

1. Wstęp

W obliczu narastających wyzwań globalnych – takich jak zmiany klimatyczne, nierówności społeczne, degradacja środowiska czy kryzysy gospodarcze – społeczność międzynarodowa coraz wyraźniej dostrzega potrzebę zrównoważonego rozwoju [1]. W odpowiedzi na te wyzwania w 2015 roku wszystkie państwa członkowskie Organizacji Narodów Zjednoczonych przyjęły dokument *Agenda 2030 na rzecz zrównoważonego rozwoju* zawierający siedemnaście Celów Zrównoważonego Rozwoju (ZR), które stanowią kompleksowy plan działań na rzecz lepszej przyszłości dla ludzi i planety [2].

Chociaż Cele ZR adresowane są przede wszystkim do rządów państw, coraz większe znaczenie w ich realizacji przypisuje się również innym podmiotom – w tym szkolnictwu wyższemu [3]. Uniwersytety nie tylko kształcą przyszłe pokolenia liderów i specjalistów, ale także prowadzą badania naukowe, wpływają na społeczności lokalne oraz są istotnymi uczestnikami życia gospodarczego i społecznego [4]. Ich rola w promowaniu, wdrażaniu i realizacji zasad zrównoważonego rozwoju jest więc nie do przecenienia.

W niniejszym opracowaniu podjęto próbę zbadania, w jakim stopniu publiczne uczelnie akademickie w Polsce włączają Cele ZR do swoich strategii rozwoju. Analiza objęła 103 uczelnie i opierała się na przeglądzie strategii dostępnych na ich stronach internetowych. Do szczegółowej analizy wyłonione zostały 54 uczelnie. Celem badania było określenie, które z celów są najczęściej uwzględniane w strategiach uczelni, która uczelnia ma najwięcej celów ZR w strategii oraz jakie są główne kierunki działań poszczególnych uczelni w kontekście zrównoważonego rozwoju.

Uzyskane wyniki pozwalają lepiej zrozumieć, jak polskie uczelnie wyższe postrzegają swoją rolę w realizacji Agendy 2030 oraz które obszary wymagają dalszego zaangażowania i wsparcia. Badanie to stanowi również punkt wyjścia do dalszej dyskusji o miejscu i odpowiedzialności szkolnictwa wyższego w budowaniu bardziej sprawiedliwego, odpornego i zrównoważonego świata.

2. Strategie uczelni a cele zrównoważonego rozwoju

Na szczycie ONZ w Nowym Jorku, który odbył się pomiędzy 25 a 27 września 2015 roku, liderzy państw członkowskich ONZ, podpisując dokument *Przekształcamy nasz świat: Agenda na rzecz zrównoważonego rozwoju 2030*, podjęli ambitne zobowiązanie podjęcia działań na rzecz realizacji Celów ZR [5]. Zobowiązania te obejmowały m.in. eliminację ubóstwa we wszystkich jego formach, zapewnienie dostępu do edukacji, żywności i czystej wody, działania na rzecz wyrównywania szans, promowanie praw człowieka, pokoju i stabilności na świecie, ochronę środowiska naturalnego, przeciwdziałanie zmianom klimatycznym oraz zapewnienie dostępu do zrównoważonych źródeł energii [6].

Uniwersytety, zwłaszcza w nadchodzących latach, powinny dołożyć wszelkich starań, aby stać się centralnymi ośrodkami przebiegu wszelkich procesów zmierzających do dynamicznego rozwoju społeczno-gospodarczego, w szczególności regionów, w których funkcjonują, uwzględniając przy tym założenia Agendy Zrównoważonego Rozwoju ONZ – kompleksowego planu rozwoju świata do 2030 roku [7].

Wszystkie 193 państwa członkowskie ONZ zobowiązały się do podjęcia działań na rzecz wdrożenia siedemnastu Celów ZR, których nazwy i opisy zostały ujęte w tabeli 1.

Tabela 1. Nazwy i opisy Celów ZR

Numer celu	Nazwa celu	Opis celu
Cel 1	Koniec z ubóstwem	Wyeliminowanie ubóstwa we wszystkich jego formach na całym świecie
Cel 2	Zero głodu	Wyeliminowanie głodu, osiągnięcie bezpieczeństwa żywnościowego i lepszego odżywienia oraz promowanie zrównoważonego rolnictwa
Cel 3	Dobre zdrowie i jakość życia	Zapewnienie wszystkim ludziom w każdym wieku zdrowego życia oraz promowanie dobrobytu
Cel 4	Dobra jakość edukacji	Zapewnienie wszystkim edukacji wysokiej jakości oraz promowanie uczenia się przez całe życie
Cel 5	Równość płci	Osiągnięcie równości płci oraz wzmocnienie pozycji kobiet i dziewcząt
Cel 6	Czysta woda i warunki sanitarne	Zapewnienie wszystkim ludziom dostępu do wody i właściwych warunków sanitarnych poprzez zrównoważoną gospodarkę zasobami wodnymi
Cel 7	Czysta i dostępna energia	Zapewnienie wszystkim dostępu do źródeł stabilnej, zrównoważonej i nowoczesnej energii po przystępnej cenie
Cel 8	Wzrost gospodarczy i godna praca	Promowanie stabilnego, zrównoważonego i inkluzywnego wzrostu gospodarczego, pełnego i produktywnego zatrudnienia oraz godnej pracy dla wszystkich ludzi
Cel 9	Innowacyjność, przemysł, infrastruktura	Budowanie stabilnej infrastruktury, promowanie zrównoważonego uprzemysłowienia oraz wspieranie innowacyjności
Cel 10	Mniej nierówności	Zmniejszenie nierówności w krajach i między krajami
Cel 11	Zrównoważone miasta i społeczności	Uczynienie miast i osiedli ludzkich bezpiecznymi, stabilnymi, zrównoważonymi oraz sprzyjającymi włączeniu społecznemu
Cel 12	Odpowiedzialne konsumpcja i produkcja	Zapewnienie wzorców zrównoważonej konsumpcji i produkcji
Cel 13	Działania w dziedzinie klimatu	Podjęcie pilnych działań w celu przeciwdziałania zmianom klimatu i ich skutkom
Cel 14	Życie pod wodą	Ochrona oceanów, mórz i zasobów morskich oraz wykorzystywanie ich w sposób zrównoważony
Cel 15	Życie na lądzie	Ochrona, przywrócenie i promowanie zrównoważonego użytkowania ekosystemów lądowych, zrównoważonego gospodarowania lasami, zwalczanie pustoszczenia, powstrzymywanie i odwracanie procesu degradacji gleby oraz powstrzymanie utraty różnorodności biologicznej
Cel 16	Pokój, sprawiedliwość i silne instytucje	Promowanie pokojowych i inkluzywnych społeczeństw, zapewnienie wszystkim ludziom dostępu do wymiaru sprawiedliwości oraz budowanie na wszystkich szczeblach skutecznych i odpowiedzialnych instytucji, sprzyjających włączeniu społecznemu
Cel 17	Partnerstwa na rzecz celów	Wzmocnienie środków wdrażania i ożywienie globalnego partnerstwa na rzecz zrównoważonego rozwoju

Źródło: opracowanie własne.

Powyższe cele koncentrują się na zapewnieniu wszystkim mieszkańcom świata godnego życia, pokoju i postępu gospodarczego, przy jednoczesnej ochronie środowiska naturalnego i przeciwdziałaniu zmianom klimatu. Tak precyzyjne określenie priorytetowych obszarów rozwoju wyznacza jednocześnie konkretne działania i wyzwania, przed którymi stoją uniwersytety w procesie budowania zarówno zrównoważonych gospodarek, jak i zrównoważonych społeczeństw [8].

3. Metodyka badań

W przeprowadzonym badaniu strategii uczelni wyższych została wykorzystana analiza źródeł zastanych. Badanie oparto na analizie dokumentów strategicznych 103 publicznych uczelni akademickich w Polsce, które były dostępne na ich stronach internetowych. Do identyfikacji publicznych uczelni akademickich wykorzystano system RAD-on [9].

Pierwszym etapem badania była identyfikacja strategii uczelni pod kątem odniesień do Celów ZR. Po jej przeprowadzeniu wykluczone zostały szkoły wyższe, które w swoich strategiach nie miały odniesień do tychże celów. Ostatecznie do analizy wybrano 54 publiczne polskie uczelnie. W kolejnym etapie przyporządkowano treści zawarte w strategiach do poszczególnych Celów ZR. Następnie przeprowadzono analizę zebranych danych i sformułowano wnioski wynikające z przeprowadzonego badania.

W wyniku przeprowadzonej analizy strategii wyłonione zostały 54 uczelnie, które w swych strategicznych dokumentach miały odniesienie do Celów ZR. Analiza dokumentów strategicznych polskich uczelni pokazała, w jaki sposób uniwersytety włączają Cele ZR do swoich strategii. Spośród zbadanych uczelni Politechnika Gdańska i Uniwersytet Przyrodniczy w Lublinie wyróżniają się najwyższą liczbą Celów ZR uwzględnionych w strategiach. Politechnika Gdańska integruje dziesięć różnych celów (cele 3, 4, 6, 7, 8, 11, 12, 13, 15 i 17), natomiast Uniwersytet Przyrodniczy w Lublinie uwzględnia dziewięć z nich (cele 2, 3, 6, 7, 11, 12, 13, 15 i 17). Różnica między tymi dwoma uczelniami dotyczy głównie odmiennego nacisku położonego na cele 2, 4 i 8.

Po dwóch wspomnianych liderach w czołówce znalazły się również Akademia Pedagogiki Specjalnej im. Marii Grzegorzewskiej (cele 4, 5, 6, 7, 10, 12, 15, 17), Uniwersytet Wrocławski (cele 4, 5, 8, 9, 10, 11, 13, 17) oraz Uniwersytet w Siedlcach (cele 4, 5, 8, 9, 10, 11, 13, 17), które uwzględniają po osiem celów. Niewiele mniej, bo siedem celów, pojawia się w strategiach takich uczelni, jak: Akademia Górniczo-Hutnicza w Krakowie (cele 4, 7, 8, 9, 11, 13, 17), Politechnika Poznańska (cele 4, 7, 9, 10, 11, 13, 17), Politechnika Rzeszowska (cele 4, 9, 10, 11, 12, 13, 17), Politechnika Śląska (cele 4, 8, 9, 11, 12, 13, 17), Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego w Warszawie (cele 4, 9, 10, 11, 12, 13, 17) i Szkoła Główna Handlowa w Warszawie (cele 4, 8, 9, 11, 12, 13, 17).

Szersza grupa uczelni, w tym Uniwersytet Jagielloński (cele 4, 6, 7, 11, 12, 17), Uniwersytet Warszawski (cele 4, 5, 8, 9, 10, 13), Uniwersytet Ekonomiczny w Krakowie (cele 4, 8, 9, 11, 13, 17), Politechnika Białostocka (cele 4, 6, 7, 11, 12, 17), Akademia Sztuk Pięknych im. Jana Matejki w Krakowie (cele 4, 8, 10, 11, 12, 17), Politechnika Warszawska (cele 4, 9, 11, 12, 13, 17), Uniwersytet Ekonomiczny we Wrocławiu (cele 4, 8, 9, 11, 13, 17) i Uniwersytet Przyrodniczy w Poznaniu (cele 3, 4, 9, 12, 13, 17), w swoich dokumentach strategicznych uwzględnia sześć celów.

Nieco mniej, bo po pięć celów, znajduje się w planach Akademii im. Jakuba z Paradyża (cele 4, 8, 9, 10, 11), Politechniki Częstochowskiej (cele 4, 8, 9, 16, 17), Politechniki Opolskiej (cele 4, 9, 11, 12, 17), Politechniki Łódzkiej (cele 4, 6, 7, 11, 12), Akademii Morskiej w Szczecinie (cele 4, 9, 11, 12, 17), Uniwersytetu Przyrodniczego we Wrocławiu (cele 4, 6, 7, 11, 12) i Uniwersytetu Warmińsko-Mazurskiego w Olsztynie (cele 3, 4, 5, 12, 13).

Uniwersytet Gdański (cele 4, 5, 10, 11), Uniwersytet Medyczny w Łodzi (cele 9, 12, 13, 17) oraz Uniwersytet Śląski w Katowicach (cele 3, 4, 11, 13) uwzględniają natomiast po cztery cele.

Niektóre uczelnie, takie jak Akademia Sztuk Pięknych w Gdańsku (cele 4, 11, 17), Politechnika Wrocławska (cele 7, 9, 11), Pomorski Uniwersytet Medyczny w Szczecinie (cele 3, 9, 13), Uniwersytet im. Adama Mickiewicza w Poznaniu (cele 4, 11, 17), Uniwersytet Komisji Edukacji Narodowej w Krakowie (cele 4, 8, 12), Uniwersytet Łódzki (cele 5, 9, 10) i Uniwersytet Rolniczy w Krakowie (cele 4, 11, 17), wskazały tylko po trzy cele strategiczne.

Istotna grupa (11 uczelni) wymienia zaledwie po dwa cele: Akademia Muzyczna im. Grażyny i Kiejstuty Bacewiczów w Łodzi (cele 4 i 8), Akademia Sztuki Wojennej (cele 4 i 8), Akademia Sztuki w Szczecinie (cele 4 i 17), Akademia Sztuk Pięknych im. Eugeniusza Gepperta we Wrocławiu (cele 4 i 8), Akademia Wychowania Fizycznego im. Polskich Olimpijczyków we Wrocławiu (cele 3 i 11), Gdański Uniwersytet Medyczny (cele 4 i 8), Politechnika Krakowska (cele 4 i 9), Uniwersytet Ekonomiczny w Poznaniu (cele 4 i 17), Uniwersytet Kardynała Stefana Wyszyńskiego w Warszawie (cele 4 i 11), Uniwersytet Opolski (cele 4 i 13) i Uniwersytet Rzeszowski (cele 4 i 11).

Wreszcie kilka instytucji (7 uczelni), w tym Akademia Piotrkowska (cel 11), Akademia Wychowania Fizycznego im. Jerzego Kukuczki w Katowicach (cel 17), Akademia Wychowania Fizycznego i Sportu im. Jędrzeja Śniadeckiego w Gdańsku (cel 8), Politechnika Koszalińska (cel 13), Uniwersytet Mikołaja Kopernika w Toruniu (cel 11), Uniwersytet Pomorski w Słupsku (cel 4) i Wojskowa Akademia Techniczna (cel 11), uwzględniło tylko po jednym celu strategicznym.

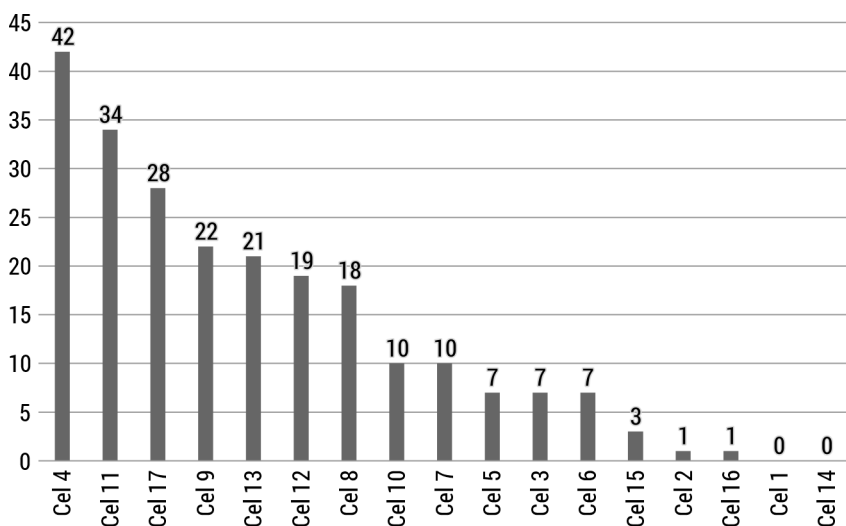
Większość uczelni odnosi się w swoich strategiach do kilku Celów ZR, jednak są też takie, które uwzględniają tylko jeden cel, co pokazuje dużą różnorodność w podejściu do tego zagadnienia wśród polskich instytucji akademickich.

Taka rozpiętość uwiadamia różne priorytety i kierunki strategiczne polskich uczelni w zakresie wdrażania zasad zrównoważonego rozwoju w szkolnictwie wyższym. Sugeruje to również szansę na wzmocnienie integracji Celów ZR w planach uczelni. Różnorodność ta odzwierciedla zarówno priorytety poszczególnych uczelni, jak i zasoby, którymi dysponują, a także wskazuje możliwe różnice w postrzeganiu roli zrównoważonego rozwoju w ich misjach akademickich.

4. Wyniki

Przeprowadzona analiza strategii 54 polskich uczelni wykazała, jak często Cele ZR były w nich uwzględniane. Celem badania było ponadto określenie, które cele pojawiały się najczęściej i którym poświęcano największą uwagę w dokumentach strategicznych.

Spośród siedemnastu celów najczęściej uwzględnianym w strategiach polskich uczelni był cel 4 (dobra jakość edukacji), który pojawił się aż w czterdziestu dwóch różnych strategiach, co przedstawiono na rysunku 1. Sugeruje to, że wiele instytucji dostrzega kluczową rolę edukacji w procesie realizacji zrównoważonego rozwoju.



Rysunek 1. Liczba polskich uczelni uwzględniających poszczególne Cele Zrównoważonego Rozwoju w swoich strategiach

Źródło: opracowanie własne.

Na drugim miejscu znalazł się cel 11 (zrównoważone miasta i społeczności) z trzydziestoma czterema wystąpieniami w strategiach, co odzwierciedla rosnącą świadomość roli uczelni w kształtowaniu bardziej zrównoważonych i odpornych przestrzeni miejskich. Trzecie miejsce zajął cel 17 (partnerstwa na rzecz celów), który

pojawił się w dwudziestu ośmiu dokumentach strategicznych, co wskazuje na rosnące znaczenie współpracy i budowania sieci partnerskich dla skuteczniejszej realizacji celów zrównoważonego rozwoju. Inne często wspominane cele to cel 9 (przemysł, innowacyjność i infrastruktura) z dwudziestoma dwoma wystąpieniami oraz cel 13 (działania w dziedzinie klimatu) z dwudziestoma jeden wystąpieniami, co podkreśla zaangażowanie uczelni we wdrażanie innowacji i odpowiedzialność środowiskową. Cel 12 (odpowiedzialna konsumpcja i produkcja) pojawił się dziewiętnaście razy, a cel 8 (wzrost gospodarczy i godna praca) osiemnaście, wskazując na istotne znaczenie zrównoważonych praktyk gospodarczych.

Rzadziej uwzględniane były cel 10 (mniej nierówności) i cel 7 (czysta i dostępna energia), które zostały ujęte po dziesięć razy. Cel 5 (równość płci), cel 3 (dobre zdrowie i jakość życia) oraz cel 6 (czysta woda i warunki sanitarne) odnotowano po siedem razy, co świadczy o nieco mniejszym uwzględnieniu kwestii społecznych i zdrowotnych przez uczelnie. Najrzadziej reprezentowanym celem był cel 15 (życie na lądzie), który pojawił się zaledwie w trzech strategiach, co uwidacznia niewielką obecność w badanych dokumentach tematów związanych z różnorodnością biologiczną i ochroną ekosystemów lądowych.

Wśród analizowanych strategii jedynie ta zaproponowana przez Akademię Pomorską w Słupsku wspomniała o celu 2 (zero głodu), natomiast cel 16 (pokój, sprawiedliwość i silne instytucje) znalazł się wyłącznie w strategii Politechniki Częstochowskiej. Szczególnie wymowny jest całkowity brak odniesień do celu 1 (koniec z ubóstwem) i celu 14 (życie pod wodą) we wszystkich przeanalizowanych dokumentach. Pokazuje to, że chociaż niektóre cele otrzymują szczególne priorytety, inne pozostają nadal słabo reprezentowane w strategiach uczelni.

Podsumowując, wyniki wskazują na zróżnicowaną, choć nierównomierną integrację Celów ZR w wizji strategicznej polskich uczelni wyższych, z wyraźnym naciskiem na kwestie edukacji, zrównoważonego rozwoju miast i rozwijania partnerstwa.

5. Podsumowanie

Strategia uczelni może zawierać ambitne cele i zobowiązania, jednak bez odpowiedniego wdrożenia jej wpływ na rzeczywistość pozostaje ograniczony. W związku z powyższym przyszłe badania powinny skupić się na tym, jak skutecznie dane cele strategiczne są realizowane i czy prowadzą do realnych zmian w funkcjonowaniu uczelni, badaniach naukowych, edukacji oraz zaangażowaniu społecznym.

Kolejnymi obszarami, które mogą być rozpatrywane w dalszych badaniach są te związane z rozwojem nowych form i metod partycypacji społecznej oraz zaangażowaniem różnych grup interesariuszy we wspólne i istotne cele. Będzie to jednak możliwe tylko poprzez połączenie wiedzy naukowej z jej praktycznym zastosowaniem [10].

Dodatkowym kierunkiem do badań może być również próba odpowiedzi na pytanie, w jaki sposób Cele ZR są włączane do programów nauczania, zajęć pozalekcyjnych i życia kampusowego, co mogłoby ukazać nowe, cenne możliwości przygotowywania studentów do działania na rzecz zrównoważonego rozwoju w ich przyszłej pracy zawodowej i społecznościach, do których należą.

Polskie uczelnie podjęły ważne pierwsze kroki, dostosowując swoje strategie do globalnych Celów ZR. Z badań wynika, że najlepiej reprezentowanymi celami w strategiach polskich uczelni były cele: 4 (dobra jakość edukacji), 11 (zrównoważone miasta i społeczności) oraz 17 (partnerstwa na rzecz celów). Najmniej reprezentowane Cele ZR to zaś cel 2 (zero głodu) i cel 16 (pokój, sprawiedliwość i silne instytucje). Przyszłe badania skoncentrowane na wdrożeniu, wpływie i zaangażowaniu studentów mogą być niezwykle znaczące dla oceny i wzmocnienia roli szkolnictwa wyższego w realizacji idei zrównoważonego rozwoju.

Uniwersytety powinny aktywnie angażować się w realizację Celów ZR i wyraźnie uwzględniać je w swoich strategicznych dokumentach. Cele ZR nie powinny być traktowane jedynie jako ogólna idea, ale jako konkretne narzędzie działania, zaplanowane i spójnie wdrażane. Opracowanie przemyślanej strategii opartej na Celach ZR może wzmocnić oddziaływanie uczelni nie tylko w obrębie edukacji i badań, ale również w szerszym spektrum, w środowisku lokalnym i globalnym. Aby to jednak osiągnąć, strategie uczelni muszą być kompleksowe, zorganizowane i nastawione na realizację wszystkich siedemnastu celów, tak aby szkoły wyższe mogły w pełni wykorzystać swój potencjał w procesie budowania zrównoważonej przyszłości.

Literatura

- [1] Latoszek, E., Proczek, M., Krukowska, M. (2016). *Zrównoważony rozwój a globalne dobra publiczne w teorii i praktyce organizacji międzynarodowych*. Szkoła Główna Handlowa w Warszawie.
- [2] Kampania 17. Celów. (n.d.). *Agenda 1030*. Retrieved May 9, 2025, from: <https://kampania17celow.pl/agenda-2030>
- [3] Sekuła, A., Miszczuk, A., Wojciechowska-Solis, J., Nucińska, J. (2022). *Zrównoważony rozwój lokalny. Podstawy teoretyczne i działania praktyczne*. Wydawnictwo Uniwersytetu Ekonomicznego we Wrocławiu.
- [4] Mazur, S., Laurisz, N., Sanak-Kosmowska, K. (2021). *Uniwersytet i edukacja wobec wyzwań współczesności*. Fundacja Gospodarki i Administracji Publicznej, MSAP.
- [5] UNIC Warsaw. (n.d.). *Agenda 2030 na rzecz zrównoważonego rozwoju – implementacja w Polsce*. Retrieved May 9, 2025, from: https://www.un.org.pl/files/170/Agenda2030PL_pl-5.pdf
- [6] Batorczak, A., Klimska, A. (2020). Edukacja na rzecz zrównoważonego rozwoju – Refleksje przed ogłoszeniem nowej dekady na rzecz zrównoważonego rozwoju (2020–2030). *Studia Ecologiae et Bioethicae*, 18(2), 17–26. <https://doi.org/10.21697/seb.2020.18.2.02>

- [7] Bebbington, J., Unerman, J. (2020). Advancing research into accounting and the UN Sustainable Development Goals. *Accounting, Auditing and Accountability Journal*, 33(7), 1657–1670. <https://doi.org/10.1108/AAAJ-05-2020-4556>
- [8] Woźnicki, J. (2022). *Trendy, modele i perspektywy rozwoju szkolnictwa wyższego w Polsce: 2021–2025 z projekcją do roku 2030*. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej.
- [9] RAD-on. (n.d.). Instytucje systemu szkolnictwa wyższego i nauki. Retrieved January 15, 2025, from: <https://radon.nauka.gov.pl/dane/instytucje-systemu-szkolnictwa-wyzszego-i-nauki?kind=13&pageNumber=1&uTypeCd=1>
- [10] Szpilko, D., Ejdyś, J. (2022). European Green Deal – research directions. A systematic literature review. *Ekonomia i Środowisko*, 81(2), 8–38. <https://doi.org/10.34659/eis.2022.81.2.455>

Bariery techniczne, ekonomiczne i organizacyjne w zarządzaniu energią elektryczną

Honorata Sierocka

Katedra Zarządzania Produkcją

Wydział Inżynierii Zarządzania

Politechnika Białostocka

h.sierocka@pb.edu.pl

Abstract: The article presents barriers related to electricity management, mainly focusing on technical, economic and organizational barriers that electricity consumers may encounter on their way. Technical problems, including power grid requirements and lack of needed infrastructure, were discussed. Economic barriers were presented, i.e. lack of sufficiently large funds for modernization and measures that could facilitate electricity management. Organizational barriers such as lack of proper knowledge in the field of energy, as well as lack of proper training, were also discussed.

Key words: energy management, barriers in management, ISO 50001

1. Wstęp

Sytuacja energetyczna zarówno w Polsce, jak i w innych krajach staje się coraz trudniejsza [1]. Rosnące ceny energii elektrycznej są problemem nie tylko odbiorców indywidualnych, ale również wszystkich instytucji publicznych oraz przedsiębiorców. Coraz częściej mówi się o zjawisku ubóstwa energetycznego i braku dostępu do niezawodnego systemu energetycznego [2]. W celu zmniejszenia rachunków za energię elektryczną odbiorcy sięgają po różne rozwiązania, m.in. montują instalacje fotowoltaiczne lub wprowadzają zabiegi mające zmniejszyć zużycie energii (np. pamiętanie o wyłączeniu światła czy planowanie prania w określonych godzinach, gdy energia jest tańsza). Niestety zdecydowana większość z nich robi to intuicyjnie, nie mając konkretnego, długofalowego planu na to, jak skutecznie zmniejszyć koszty energii elektrycznej.

W przypadku przedsiębiorców właściwym rozwiązaniem jest wprowadzenie systemu zarządzania energią elektryczną [3]. Niestety niewielu z nich podchodzi do tego systemowo, a dzieje się tak, ponieważ odbiorcy napotykają szereg barier mogących zniechęcać do racjonalnego zarządzania energią. Do głównych problemów, jakie mogą spotkać na swojej drodze przedsiębiorstwa lub instytucje, należą: problemy ekonomiczne związane z kosztami wprowadzania nowych rozwiązań, problemy organizacyjne związane z właściwym podejściem do zarządzania energią

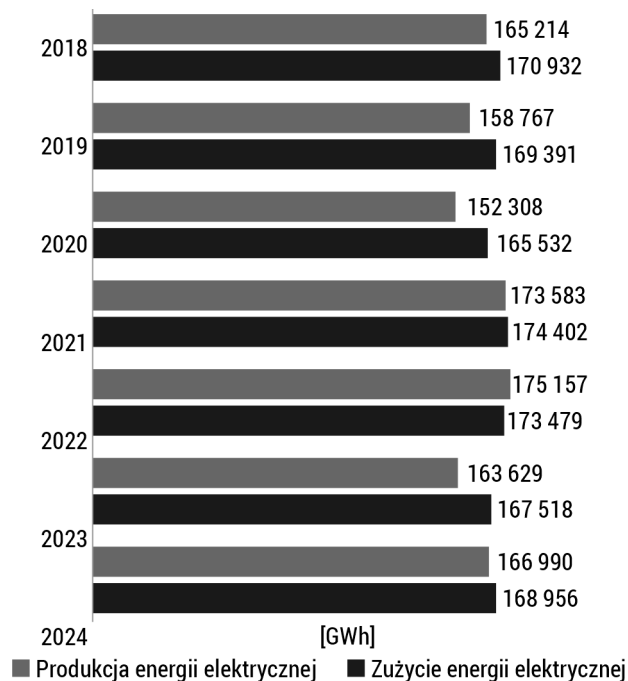
i rozumieniem skomplikowanych przepisów prawnych, a także bariery techniczne – zarówno indywidualne, jak i występujące w całej sieci przesyłowej.

W niniejszej pracy omówiono znaczenie zarządzania energią elektryczną oraz przedstawiono bariery, jakie mogą spotkać na swojej drodze osoby chcące zacząć rozsądnie zarządzać energią elektryczną. Celami tejże pracy są identyfikacja, usystematyzowanie i krytyczna analiza barier technicznych, ekonomicznych i organizacyjnych w zarządzaniu energią elektryczną, ze szczególnym odniesieniem do realiów Polski. Zakres pracy obejmuje przegląd literatury i danych wtórnych oraz syntezę wniosków przydatnych dla praktyki wdrożeniowej (w tym w kontekście ISO 50001), a także wskazanie obszarów wymagających dalszych badań.

2. Znaczenie zarządzania energią

Zarządzanie energią elektryczną to kluczowy aspekt, jeśli odbiorcy chcą zapewnić sobie niezawodną, opłacalną i zrównoważoną eksploatację systemów energetycznych [4]. Jest to szczególnie ważne dla małych i średnich przedsiębiorstw oraz jednostek samorządowych. Wprowadzenie odpowiedniego systemu zarządzania pozwala równoważyć produkcję i konsumpcję energii elektrycznej na konkretnych obszarach. Dodatkowo, oprócz zmniejszenia kosztów energii elektrycznej, odbiorcy, dzięki systemowi zarządzania energią, mogą zadbać o środowisko i pozytywnie wpływać na emisję gazów cieplarnianych. Zmniejszenie zużycia energii i wprowadzenie korzystania z odnawialnych źródeł energii (OZE) przyczynia się do tego znacząco. Poza istotnym wpływem na wysokość rachunków za energię elektryczną i korzystnym oddziaływaniem na środowisko zarządzanie energią elektryczną może wpłynąć na bezpieczeństwo i niezależność energetyczną [5–7]. Obecnie znaczna część energii w Polsce jest kupowana z innych krajów, bowiem produkcja krajowej energii elektrycznej nie wystarcza na pokrycie istniejącego zapotrzebowania [8]. Ilość produkowanej energii elektrycznej i jej zużycie w Polsce w latach 2018–2024 przedstawiono na rysunku 1. Zauważalne jest, iż obecnie coraz bliżej nam do realizacji pełnego zapotrzebowania na energię elektryczną, chociaż w latach 2018–2020 niedobór ten był znaczący, co może wiązać się ze zwiększaniem w ostatnich latach udziału instalacji fotowoltaicznych w całkowitej produkcji energii elektrycznej w Polsce.

Dla wielu podmiotów istotniejsze od aspektów techniczno-ekonomicznych jest dbanie o wizerunek firmy. Wszelkiego rodzaju działania mające na celu promowanie podejścia proekologicznego wzmacniają zaś wiarygodność rynkową i mogą przyciągać potencjalnych klientów i inwestorów. Ponadto właściwe zarządzanie energią elektryczną stanowi podstawę sprawnej transformacji energetycznej. Bez zaplanowanych i przemyślanych działań transformacja energetyczna, zmniejszanie emisji szkodliwych spalin i wprowadzanie odnawialnych źródeł energii nie będą możliwe [6, 7].



Rysunek 1. Produkcja i zużycie energii elektrycznej w Polsce w GWh w latach 2018–2024

Źródło: [8].

Podstawą zarządzania energią elektryczną jest norma ISO 50001:2018 – System zarządzania energią, która podaje właściwe wymagania i wytyczne do stosowania [3]. Norma ISO 50001 to międzynarodowy standard określający zasady dotyczące systemu zarządzania energią (EnMS). Celem normy jest wspieranie organizacji – zarówno przemysłowych, usługowych, jak i publicznych – w ciągłej poprawie efektywności energetycznej, redukcji zużycia energii oraz ograniczaniu emisji gazów cieplarnianych. ISO 50001 opiera się na podejściu systemowym, zgodnym z cyklem Deminga (PDCA, czyli Plan-Do-Check-Act), co oznacza, że organizacje planują działania energetyczne, wdrażają je, monitorują ich efekty, a następnie podejmują działania korygujące i doskonalące [3].

3. Bariery techniczne

Bariery techniczne stanowią jedne z barier, jakie odbiorcy energii elektrycznej mogą spotkać na swojej drodze do właściwego zarządzania energią [9]. Są to ograniczenia związane z infrastrukturą, urządzeniami lub oprogramowaniem. Pierwsza z barier to problem z integralnością instalacji i systemów zarządzania. Niestety używana infrastruktura, którą posiadają odbiorcy energii elektrycznej, to urządzenia różnej generacji, przez co użytkownicy mogą napotkać szereg problemów z połączeniem

i spójnym działaniem systemów. W wielu przedsiębiorstwach można znaleźć przestarzałe instalacje wykonane kilka dekad temu, które niestety charakteryzują się niską sprawnością energetyczną, wysokimi stratami energii oraz ograniczonymi możliwościami monitorowania bieżącej sytuacji [10]. Kolejną z barier technicznych jest brak właściwej infrastruktury, takiej jak sieci przesyłowe, brak lokalnych producentów energii elektrycznej oraz ograniczony dostęp do zaawansowanych rozwiązań technicznych. W związku z tym nawet zastosowanie odnawialnych źródeł energii w instalacji może nie przynieść spodziewanych korzyści, przez co konieczne będzie wybudowanie magazynu energii, aby w pełni korzystać z wygenerowanej energii elektrycznej, nie powodując przy tym strat w przedsiębiorstwie [11, 12]. Inną bardzo ważną barierą jest niewystarczająca ilość zaawansowanych systemów monitoringu zużycia energii (EMS – *energy management system*). Brak systemów EMS w instalacjach elektrycznych sprawia, że nie ma możliwości bieżącego monitorowania zużycia energii elektrycznej, co znacząco wpływa na skuteczność zarządzania energią i szybkość reagowania na zachwiania zużycia energii, a także na planowanie jej zużycia w przyszłości [13–15].

Bariery techniczne w zarządzaniu energią są wieloaspektowe i obejmują trudności integracyjne, brak wiedzy specjalistycznej oraz luki infrastrukturalne. Pokonanie ich wymaga nie tylko wprowadzenia odpowiednich rozwiązań technicznych, ale także wspierających polityk, zachęt finansowych i budowania potencjału w celu zapewnienia skutecznego i powszechnego przyjęcia praktyk zarządzania energią.

4. Bariery ekonomiczne

Bariery ekonomiczne są równie ważnym aspektem jak bariery techniczne. Zakup nowych rozwiązań i inwestycja w modernizację i szkolenia kadry wiążą się z wydatkiem znacznych sum pieniędzy. Wysokie koszty początkowe inwestycji są bardzo często głównym problemem w zarządzaniu energią. Wielu odbiorców, zarówno indywidualnych, jak i małych i średnich przedsiębiorstw, boryka się z brakiem nakładów inwestycyjnych wymaganych do wprowadzania systemów zarządzania energią [16, 17].

Kolejnym z czynników ekonomicznych jest wsparcie finansowe jako beneficjent różnego rodzaju programów wspierających rozwój i dbanie o środowisko. Niestety, staranie się o dofinansowania lub fundusze zewnętrzne często jest niezbędne do wdrożenia modernizacji lub nowych rozwiązań. Wysokie koszty finansowe inwestycji często wiążą się z koniecznością zaciągnięcia kredytów lub wsparcia się różnego rodzaju programami i środkami zewnętrznymi. Wiele z nich stawia jednak przed odbiorcami wysokie wymagania, które bardzo trudno jest spełnić, co szczególnie zniechęca przedsiębiorców do wdrażania nowych rozwiązań [16].

5. Bariery organizacyjne

Odbiorcy nie zawsze mają czas i kompetencje do wprowadzania zarządzania energią. Brak czasu i pochłonięcie codziennością często utrudniają odbiorcom energii elektrycznej rozpoczęcie tego procesu [18]. Dodatkowo, szczególnie w małych i średnich przedsiębiorstwach, dochodzi do tego priorytet produkcji i sprzedaży, a problemem może być w tym przypadku również szczupła struktura organizacyjna i brak wystarczających zasobów ludzkich, aby rzetelnie wprowadzić taki system zarządzania [19].

Niedobór wykwalifikowanych osób to kolejny z problemów strukturalnych. Często przedsiębiorstwa uważają za zbędne zatrudnianie osób specjalizujących się w zarządzaniu energią, zaś opłacanie pensji dodatkowej osoby, niepracującej przy produkcji, wydaje im się niepotrzebne. Zatrudnienie osoby posiadającej kwalifikacje w zakresie zarządzania energią może jednak przynieść znaczące zyski dla przedsiębiorstwa, poprawić jego wynik energetyczny i zredukować koszty opłat za energię elektryczną [11, 12].

Ponadto w wielu przedsiębiorstwach brakuje zaangażowania kierownictwa w sprawy zarządzania energią. Nie widzą oni potrzeby szkolenia swoich pracowników i zwiększania ich świadomości energetycznej. Wbrew ich myśleniu takie działania mogą się przyczynić do zmniejszenia zużycia energii elektrycznej. Opór ten może wynikać z braku wiedzy lub uprzedzeń do wprowadzania zmian [11].

Ostatnią z barier organizacyjnych jest częsty brak sprecyzowanych regulacji prawnych. Niedokładne przepisy i ich zawilość nierzadko zniechęcają przedsiębiorców do implementacji zmian i stosowania systemów zarządzania energią. Jest to bardzo istotny czynnik, ponieważ brak jasnej i jednolitej interpretacji przepisów prawnych lub ich częste modyfikacje nie zapewniają stabilności i wymuszają na przedsiębiorcach ciągłe śledzenie zmian w prawodawstwie [12, 17, 20].

6. Podsumowanie

Mimo powszechnego dążenia do poprawy wyniku energetycznego, zmniejszenia zużycia energii elektrycznej oraz zintensyfikowania dbania o środowisko nadal wielu odbiorców robi to świadomie. Konieczne jest podjęcie działań w kierunku ujednolicenia przepisów i wspieranie tych, które mogą zmniejszać zależność energetyczną. Zarządzanie energią w organizacjach wymaga nie tylko dostępu do technologii, ale również odpowiedniego środowiska instytucjonalnego i organizacyjnego. Kluczowe znaczenie ma tu norma ISO 50001, której wdrożenie umożliwia przejście od podejścia reaktywnego do proaktywnego. Tylko podejście zintegrowane, oparte na danych, kompetencjach i przywództwie, może bowiem przynieść trwałe efekty i przyczynić się do realizacji celów klimatycznych oraz budowy konkurencyjnej go-

spodarki niskoemisyjnej. Wprowadzenie preferencyjnych mechanizmów finansowania inwestycji w efektywność energetyczną znacząco przyspieszyłoby rozwój systemów zarządzania.

Zarządzanie energią wymaga interdyscyplinarnego podejścia, opartego na normach, danych, kompetencjach i przywództwie. Przewyciężenie barier technicznych, ekonomicznych, organizacyjnych i prawnych jest zaś możliwe tylko dzięki długofalowej strategii i wspólnemu zaangażowaniu sektorów publicznego i prywatnego oraz świata nauki. W nadchodzących latach efektywność energetyczna nie będzie już tylko domeną liderów branżowych – stanie się warunkiem koniecznym do utrzymania się na rynku.

Należy również pamiętać, że w dobie cyfryzacji i rozwoju sztucznej inteligencji konieczne jest zabezpieczanie danych w systemach zarządzania energią przed atakami hakerskimi. Ataki na infrastrukturę energetyczną stają się realnym zagrożeniem, co wymaga stosowania certyfikowanych systemów oraz tworzenia procedur awaryjnych.

Zarządzanie energią nie ogranicza się jednak wyłącznie do działań technicznych. Współczesne podejście zakłada konieczność współpracy w ramach różnych dziedzin: inżynierii, ekonomii, psychologii organizacyjnej oraz nauk o zarządzaniu.

W artykule bariery zarządzania energią podzielono na trzy grupy – techniczne, ekonomiczne i organizacyjne – i pokazano, jak się na siebie wzajemnie nakładają. Przykładem może być sytuacja, w której brak monitoringu lub EMS utrudnia decyzje inwestycyjne i utrwała braki kompetencyjne. W ramach rozwiązania zaproponowano spojrzenie na wdrożenia przez pryzmat ISO 50001 i cyklu PDCA: od szybkich usprawnień, po inwestycje wymagające większego kapitału. Analiza została oparta o polskie realia (rysunek 1), dzięki czemu łatwiej przełożyć wnioski na konkretne działania i obszary do dalszych badań. Z wyników przeglądu mogą skorzystać firmy, zwłaszcza małe i średnie przedsiębiorstwa, a także samorządy. Odbiorcy mogą najpierw uruchomić monitoring/EMS, następnie wdrażać działania niskokosztowe, a na końcu modernizację i szkolenia. Menedżerom i firmom lista barier posłuży zaś jako czytelna podstawa do audytów i planów poprawy. Dla odbiorców i instytucji finansujących wskazujemy z kolei wąskie gardła (koszty startu, niepewność regulacyjna, braki infrastruktury), co ułatwia projektowanie programów wsparcia.

Acknowledgments. This work was supported by the Ministry of Science and Higher Education in Warsaw, Poland, at the Białystok University of Technology in Białystok, Poland, under research subsidies No. WZ/WIZ-INZ/4/2025

Literatura

- [1] Drago, C., Gatto, A. (2023). Gauging energy poverty in developing countries with a composite metric of electricity access. *Utilities Policy*, 81, 101486. <https://doi.org/10.1016/j.jup.2022.101486>
- [2] Nock, D., Levin, T., Baker, E. (2020). Changing the policy paradigm: A benefit maximization approach to electricity planning in developing countries. *Applied Energy*, 264, 114583. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.114583>
- [3] ISO 50001:2018-09: Energy management systems – Requirements with guidance for use. (n.d.).
- [4] Aman, S., Simmhan, Y., Prasanna, V. K. (2013). Energy management systems: state of the art and emerging trends. *IEEE Communications Magazine*, 51(1), 114–119. <https://doi.org/10.1109/MCOM.2013.6400447>
- [5] Alam, M. S., Arefifar, S. A. (2019). Energy management in power distribution systems: Review, classification, limitations and challenges. *IEEE Access*, 7, 92979–93001. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2927303>
- [6] Tabar, V. S., Abbasi, V. (2019). Energy management in microgrid with considering high penetration of renewable resources and surplus power generation problem. *Energy*, 189, 116264. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.116264>
- [7] Meliani, M., Barkany, A. E., Abbassi, I. E., Darcherif, A. M., Mahmoudi, M. (2021). Energy management in the smart grid: State-of-the-art and future trends. *International Journal of Engineering Business Management*, 13, 18479790211032920. <https://doi.org/10.1177/18479790211032920>
- [8] RynekElektryczny.pl. (2025). *Produkcja energii elektrycznej. Raport roczny 2018–2024*. <https://www.rynekelektryczny.pl/produkcja-energii-elektrycznej-raport-roczny>
- [9] Rae, C., Kerr, S., Maroto-Valer, M. M. (2020). Upscaling smart local energy systems: A review of technical barriers. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 131, 110020. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110020>
- [10] Mohseni, S., Brent, A. C. (2025). Long-term planning optimisation of sustainable energy systems: A systematic review and meta-analysis of trends, drivers, barriers, and prospects. *Energy Strategy Reviews*, 57, 101640. <https://doi.org/10.1016/j.esr.2025.101640>
- [11] Khafiso, T., Aigbavboa, C., Adekunle, S. A. (2024). Barriers to the adoption of energy management systems in residential buildings. *Facilities*, 42(15–16), 107–125. <https://doi.org/10.1108/F-12-2023-0113>
- [12] Siddique, Md. N. I., Hasan, A. S. M. M., Kabir, Md. A., Prottasha, F. Z., Samin, A. M., Soumik, S. S., Trianni, A. (2022). Energy management practices, barriers, and drivers in Bangladesh: An exploratory insight from pulp and paper industry. *Energy for Sustainable Development*, 70, 115–132. <https://doi.org/10.1016/j.esd.2022.07.015>

- [13] Al-Ali, A. R., Zualkernan, I. A., Rashid, M., Gupta, R., Alikarar, M. (2017). A smart home energy management system using IoT and big data analytics approach. *IEEE Transactions on Consumer Electronics*, 63(4), 426–434. <https://doi.org/10.1109/TCE.2017.015014>
- [14] Oriti, G., Julian, A. L., Peck, N. J. (2016). Power-electronics-based energy management system with storage. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 31(1), 452–460. <https://doi.org/10.1109/TPEL.2015.2407693>
- [15] Anvari-Moghaddam, A., Rahimi-Kian, A., Mirian, M. S., Guerrero, J. M. (2017). A multi-agent based energy management solution for integrated buildings and microgrid system. *Applied Energy*, 203, 41–56. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.06.007>
- [16] Lawrence, A., Thollander, P., Karlsson, M. (2018). Drivers, barriers, and success factors for improving energy management in the pulp and paper industry. *Sustainability*, 10(6), 1851. <https://doi.org/10.3390/su10061851>
- [17] Iqbal, M., Ma, J., Ahmad, N., Hussain, K., Usmani, M. S., Ahmad, M. (2021). Sustainable construction through energy management practices in developing economies: An analysis of barriers in the construction sector. *Environmental Science and Pollution Research*, 28, 34793–34823. <https://doi.org/10.1007/s11356-021-12917-7>
- [18] Lawrence, A., Nehler, T., Andersson, E., Karlsson, M., Thollander, P. (2019). Drivers, barriers and success factors for energy management in the Swedish pulp and paper industry. *Journal of Cleaner Production*, 223, 67–82. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.03.143>
- [19] Jalo, N., Johansson, I., Andrei, M., Nehler, T., Thollander, P. (2021). Barriers to and drivers of energy management in Swedish SMEs. *Energies*, 14(21), 6925. <https://doi.org/10.3390/en14216925>
- [20] Alhammadi, Y., Kineber, A. F., Alhusban, M. (2024). Investigating barriers to the adoption of energy management practices for sustainable construction projects: SEM and ANN approaches. *Civil Engineering Journal*, 10(4), 1232–1253. <https://doi.org/10.28991/CEJ-2024-010-04-015>

Application of artificial intelligence in Intelligent Transport Systems – selected examples

Natalia Sturgulewska

International Department of Logistics

and Service Engineering

Faculty of Engineering Management

Białystok University of Technology

natalia.sturgulewska@pb.edu.pl

Abstract: The paper explores the application of artificial intelligence in urban transport, with a focus on its integration into Intelligent Transport Systems. It presents three practical examples in different fields of urban transport: traffic management, public transport optimization, and micromobility development. Three practical cases – Hangzhou’s City Brain, Lime e-scooters in San Jose, and Singapore’s public transport – illustrate how AI improves traffic flow, safety, and transport efficiency.

Key words: artificial intelligence, Intelligent Transport Systems, urban transportation

1. Introduction

The concept of Intelligent Transport Systems (ITS) emerged in the 1980s among a group of transportation experts, who were seeking to acknowledge the transformative influence of computing and communication technologies within the transportation sector. Initially, the idea referred to intelligent vehicle-highway systems, but over the past decade, ITS has assumed a crucial role on the global stage, with its applications extending well beyond highway traffic management. It now encompasses services across navigation, railway, maritime, and aviation systems, thereby generating considerable volumes of data [1].

Transportation systems face many challenges associated with rising travel demand, carbon dioxide emissions, safety issues, and environmental degradation. Artificial intelligence is perceived as an appropriate means to effectively tackle these and other challenges faced by transport systems [2].

The origins of artificial intelligence (AI) are commonly traced back to a conference held at Dartmouth in 1956. The conference’s organizers suggested a research project focused on developing artificial intelligence, with the primary objective of constructing machines capable of behavior that would be considered intelligent if exhibited by humans. AI does not have a single widely recognized definition [3].

One of the numerous definitions of artificial intelligence characterizes it as a system's capability to accurately interpret external data, learn from that data, and apply the acquired knowledge to accomplish specific objectives and tasks through adaptive and flexible behavior [4].

AI can be applied across various aspects of transportation. Among its many functions, AI can offer recommendations aimed at improving the speed or cost-efficiency of transportation operations. Additionally, artificial intelligence tools contribute to minimizing the negative impact transportation has on the environment. They also enhance the efficiency of repetitive and monotonous tasks by automating processes and reducing the risk of human error [5].

The purpose of this study is to examine selected examples of AI applications within Intelligent Transport Systems, emphasizing their functionalities and potential advantages for sustainable transport development. Moreover, the study answers the research questions posed: How does artificial intelligence support the objectives of Intelligent Transport Systems in different urban contexts? What functions of artificial intelligence may be used in ITS? What benefits did the implementation of AI-based solutions bring to the three cities analyzed?

2. Artificial intelligence in transportation – general overview

AI is deemed to be a good fit for transportation systems to overcome the challenges of an increasing travel demand, CO₂ emissions, safety concerns, and environmental degradation. These challenges arise from the steady growth of rural and urban traffic. For example, in Melbourne, Australia alone, more than 640 km of arterial roads are congested during peak time with a CO₂ emission of 2.9 tons per year. Many researchers in the 21st-century have attempted to accomplish a more reliable transport system with less effect on people and the environment [2].

There are several artificial intelligence methods used in transport [7, 8, 9]. Among them, Artificial Neural Networks (ANNs) have demonstrated particular effectiveness in forecasting traffic accidents. In this context, an ANN-based model was developed to examine the correlation between drivers' characteristics – such as age, driving experience, gender, and other relevant factors – and the likelihood of being involved in a traffic accident [6]. Moreover, neural networks are capable of predicting vehicle speed at a detector station up to 15 minutes in advance, making them suitable in short-term traffic forecasting applications [7].

The Genetic Algorithm (GA) is another example of an artificial intelligence method applied in transportation. It is used, among other methods, to optimize routing techniques. GAs can create and improve solutions for dynamically planning truck routes by imitating the concepts of evolutionary processes. These solutions can include real-time variables like traffic congestion, detours, and scheduled delivery

times. Additionally, in the context of traffic management, GAs help determine the best configurations for controlling traffic signals, which helps to optimize traffic flow overall and decrease waiting times for vehicles [8].

Simulated Annealing (SA) is another artificial intelligence technique used in the transportation industry. By creating routes that are most suited to shipping needs, this optimization strategy can be utilized to minimize driver operating costs, cut down on the number of vehicles required or lessen road toll prices. In addition, it facilitates the reduction of overall distance traveled, which improves transport logistics' performance and cost-effectiveness [9].

The integration of AI into the transportation sector is significantly improving route planning, incident response and dynamic traffic management. Progress in AI methods has facilitated the development of flexible and responsive Intelligent Transport Systems, capable of efficiently addressing the increasing demands of modern transportation networks [8].

3. Selected applications of AI in Intelligent Transport Systems

This chapter discusses three examples of artificial intelligence applications within urban transport systems that align closely with ITS framework. The analyzed cases encompass road traffic management, public transport optimization, and micromobility development. The following examples illustrate how AI strengthens core ITS functionalities and supports the achievement of their strategic objectives.

3.1. Traffic management – the case of City Brain

The example of AI application in the field of smart traffic management is City Brain which was launched in 2016 in a Chinese city of Hangzhou [10]. City Brain is a system that uses large amounts of data and artificial intelligence to help manage and improve cities in ways that people alone cannot. It collects, combines, and analyzes different types of data from multiple sources in urban areas, using tools like video and image recognition, data mining, and machine learning [11].

The system operates on a digital platform which, in its initial version (City Brain 1.0), relied on data collected from sensors installed in traffic lights and integrated with traffic cameras. Real-time data from this sensor network was processed using cloud computing technologies to optimize traffic flow by dynamically adjusting traffic light timings. Furthermore, the ability to control traffic light schedules has facilitated the improvement of traffic flows for emergency response vehicles, including the creation of green light corridors across the city to ensure rapid response times when necessary [10].

Secondly, an updated version of City Brain was introduced in 2018 and it covered 420 square kilometers and 1300 traffic lights. Furthermore, more than 200 traffic officers were able to connect through mobile phones, allowing them to receive real-time alerts regarding any traffic-related emergencies. The new version had a new feature for fire fighters – City Brain enhanced the city’s firefighting capabilities by supplying firefighters with essential information, including water pressure levels, the quantity and location of fire hydrants, the positioning of gas pipelines, and other critical data necessary for effective emergency response [12].

In 2020, the system was upgraded to version 3.0 aiming to integrate digital data even further. One of the new features was characterized as strengthening the city’s digital immunity against events such as natural disasters. For example, in case of a typhoon the system is expected to track a typhoon before it reaches land, simulate its potential trajectory through the city, and proactively mobilize emergency response systems and resources based on early warnings [10].

City Brain increased not only the safety in the city, but it also decreased traffic congestion. Hangzhou used to be ranked the fifth most congested city in China, but it has dropped to 57th. However, according to a survey conducted by the technology company Tencent (TCEHY) in collaboration with the Chinese state broadcaster CCTV, nearly 80% of respondents expressed concerns regarding the impact of artificial intelligence on their privacy. This may pose a challenge in implementing similar systems elsewhere [13].

The City Brain concept, based on real-time data processing and the integration of information from multiple sources, is functionally compatible with Intelligent Transport Systems, as the City Brain acts as a platform to coordinate the various components of the urban system, including transport [14].

3.2. Urban micromobility – the case of Lime e-scooters

An example of AI application in urban micromobility is Lime, which operates shared e-bike and e-scooter programs across seventeen countries and more than 200 cities worldwide [15]. In 2020 the company announced a program in San Jose, USA, that utilized an AI-based statistical model to analyze data from scooter sensors, in order to detect sidewalk riding. The model is trained to recognize characteristic patterns of vibration and speed that indicate when a scooter is being operated on the sidewalk rather than on the roadway. When the system determines with high probability that a user has been riding on the sidewalk (and for how long), Lime can impose consequences, such as issuing a warning, and the city can use this information to support regulatory enforcement [16, 17].

Lime’s subsequent advancement was the introduction of the Lime Vision system in 2022. This platform represents the industry’s first AI-enabled vision solution developed internally by an operator to enhance safety and prevent incidents. Lime Vision employs an on-board camera and machine learning models to detect in real

time, whether a scooter is being ridden on the sidewalk. When sidewalk riding is identified, the system immediately alerts the rider with an audible signal and automatically slows the vehicle, encouraging a return to the cycle path before a potential collision with a pedestrian can occur. By integrating AI directly into the scooter's hardware, Lime is able to continuously refine its algorithms – drawing on data from its global fleet – and expand the solution to more cities. This initiative, along with other measures such as user testing for late-night rentals to screen out intoxicated users, is expected to make micromobility both safer and more community-friendly [18], which is one of the primary goals of ITS [19].

3.3. Public transport – the case of Singapore

Singapore's public transport authority (PTA) has addressed challenges related to safety and operational efficiency through the implementation of Streamax's artificial intelligence technologies. These encompass advanced driver assistance systems, driver fatigue monitoring, high-capacity surveillance infrastructure and blind spot detection [20]. The Blind Spot Detection System (BSD) is installed on both sides of a vehicle, functioning as a two-way alarm mechanism designed to enhance safety for both pedestrians and drivers. The system works dynamically by automatically recognizing when a vehicle is turning and adjusting the range of blind spot detection. It ensures that pedestrians are made aware of an approaching vehicle, while simultaneously alerting the driver to take necessary actions to maintain a safe distance. This system enables the prediction of possible road risks in advance so the driver can brake or make necessary steering maneuvers. On the other hand, it uses machine learning to minimize the number of false alarms by identifying pedestrians and green zones. Additionally, cameras integrated with the BSD record all alarms and incidents, providing retrievable evidence for future reference. Fleet operators are thereby able to monitor and analyze individual driving behaviors, facilitating the promotion of safer driving practices across their operations [21].

The modernization initiative has led to substantial improvements in safety, service quality, and the enforcement of bus lane regulations. Additionally, passengers now benefit from real-time displays indicating seat availability, particularly regarding upper-deck occupancy. To date, 5,500 buses operated by all four of Singapore's public transport operators (PTOs) have been equipped with these enhancements [20].

Another AI-based system, called Overwatch, operates in trains in Singapore. Through the utilization of artificial intelligence to monitor and analyze continuous video footage of train operations, Overwatch is capable of predicting potential congestion points and proposing alternative routing strategies to assist operators in mitigating such issues. Additionally, it can detect operational disruptions, such as malfunctions in the proper closure of train doors. The system monitors all kinds of data including the precise location of trains within the network, the duration of their

stops, and the current drive mode of each train. Overwatch is available not only to personnel at the operations control and maintenance engineering center, but also to staff located outside the control center who require a comprehensive overview of the network's status. For instance, when a train stops for longer than usual, a timer appears in the system. The timer changes color according to the delay, to signal urgency of the situation [22].

The concepts described are not only an example of the application of artificial intelligence to public transport, but also an integral part of a broader Intelligent Transport Systems approach being implemented by the Singapore Land Transport Authority (LTA). According to the LTA's official approach, ITS uses, among other things, a network of sensors and data analytics to improve the efficiency of the road network, improve traffic flow monitoring and management, and enhance safety. Consequently, the technologies in question are closely aligned with and contribute directly to the achievement of ITS objectives and operational functions [23].

4. Comparison of cases

This chapter presents a comparative summary of three selected cases of AI applications in urban transport, each implemented in a different geographical and functional context. The analyzed examples – City Brain in Hangzhou (China), Lime e-scooters in San Jose (USA), and AI-based systems in Singapore's public transport – demonstrate diverse approaches to integrating AI technologies into ITS.

The table below outlines key aspects of each case, including their operational focus, AI functions, connection to ITS objectives, and observed outcomes.

Table 1. Key results of selected AI applications in urban mobility

Application area Criterion	Traffic management	Urban micromobility	Public transport
City, country	Hangzhou, China	San Jose, USA	Singapore
AI functions	traffic light management, ensuring emergency vehicle priority, crisis management	sidewalk riding detection, auto slow-down, audio alerts	driver fatigue monitoring, delay and disruption prediction, blind spots detection
Connection to ITS	enhances safety and reduces congestions in the city	supports safety and promotes sustainability	enhances safety and efficiency of transportation networks
Implementation outcomes	reduced congestion (from 5th to 57th in congestion ranking), improved emergency response, improved safety	improved pedestrian safety, better integration with urban space	improved safety, improved public transport punctuality, ensures enforcement of bus lane rules

Source: own studies.

The comparative analysis shows that, regardless of application area, AI plays a critical role in improving safety, operational efficiency, and system responsiveness. All three cases contribute directly to the core goals of ITS by facilitating data-driven decision-making, real-time reaction to events, and optimization of transport resources. While each case differs in scope and technological implementation, some common patterns emerge. Firstly, safety enhancement is a universal benefit, whether through fatigue monitoring, sidewalk detection, or optimized emergency routing. Secondly, data integration and real-time processing are crucial to enabling AI to effectively support ITS objectives. Lastly, AI-based systems improve the efficiency of urban transportation.

However, it is worth noting that all three analyzed cases reference the use of machine learning techniques, but this does not imply that machine learning is the only form of artificial intelligence used in these systems. Due to limited publicly available technical information, the author was not able to verify the exact types of AI models implemented in each case.

5. Conclusions

The paper addressed three research questions. The first concerned how artificial intelligence supports the objectives of Intelligent Transport Systems in different urban contexts. The findings show that AI applications can directly support core ITS objectives, including safety, efficiency, and data-driven responsiveness. The second question focused on the functions of artificial intelligence that may be used in ITS. The analysis revealed that in each case AI has some specific functions depending on the urban context. These include traffic light management, auto slowdown of e-scooters and driver fatigue monitoring. The final question explored the benefits brought by the implementation of AI-based solutions in the three cities analyzed. The study demonstrated that these solutions may lead to reduced congestion, faster emergency response, improved passenger and driver safety and increased overall transport system efficiency.

The article has some limitations, among which are the lack of a quantitative evaluation of the impact of the implemented systems on transport efficiency and the absence of a detailed analysis of the social and legal conditions associated with their implementation.

In further research, the author intends to focus on assessing the long-term impact of AI in ITS, particularly in the context of social adaptation and sustainability. An analysis of the level of social acceptance of AI solutions, especially those based on video analysis and location data, will also be an important area of interest. Furthermore, it is planned to compare the effectiveness of different AI models applied to urban transport depending on the scale of implementation and cultural context. Another important direction will be the identification of potential ethical and legal risks associated with the application of AI in traffic management and traffic participant behavior.

Literature

- [1] Kaffash, S., Nguyen, A. T., Zhu, J. (2021). Big data algorithms and applications in intelligent transportation system: A review and bibliometric analysis. *International Journal of Production Economics*, 231, 107868.
- [2] Abduljabbar, R., Dia, H., Liyanage, S., Bagloee, S. A. (2019). Applications of artificial intelligence in transport: An overview. *Sustainability*, 11(1), 189.
- [3] Berente, N., Gu, B., Recker, J., Santhanam, R. (2021). Managing artificial intelligence. *MIS Quarterly*, 45(3), 1433–1450.
- [4] Haenlein, M., Kaplan, A. (2019). A brief history of artificial intelligence: On the past, present, and future of artificial intelligence. *California Management Review*, 61(4), 000812561986492.
- [5] Kar, A. K., Varsha, P. S., Rajan, S. (2023). Unravelling the impact of generative artificial intelligence (GAI) in industrial applications: A review of scientific and grey literature. *Global Journal of Flexible Systems Management*, 24(4), 659–689.
- [6] Doğan, E., Akgüngör, A. P. (2013). Forecasting highway casualties under the effect of railway development policy in Turkey using artificial neural networks. *Neural Computing and Applications*, 22(5), 869–877.
- [7] Dia, H. (2001). An object-oriented neural network approach to short-term traffic forecasting. *European Journal of Operational Research*, 131(2), 253–261.
- [8] Mirindi, D. (2024). A review of the advances in artificial intelligence in transportation system development. *Journal of Civil, Construction and Environmental Engineering*, 9(3), 72–83.
- [9] Salsabila, A. S. (2023). Optimization of vehicle routing problem using guided local search and simulated annealing. *JENIUS: Jurnal Terapan Teknik Industri*, 4(2), 155–166.
- [10] Caprotti, F., Liu, D. (2022). Platform urbanism and the Chinese smart city: The co-production and territorialisation of Hangzhou City Brain. *GeoJournal*, 87(3), 1559–1573.
- [11] Zhang, J., Hua, X. S., Huang, J., Shen, X., Chen, J., Zhou, Q., Fu, Z., Zhao, Y. (2019). City brain: Practice of large-scale artificial intelligence in the real world. *IET Smart Cities*, 1(1).
- [12] Alizila. (2018). Alibaba cloud launched ‘ET City Brain 2.0’ in Hangzhou. <https://www.alizila.com/alibaba-cloud-launched-city-brain-2-0-hangzhou>
- [13] CNN Business. (2019). Alibaba’s ‘City Brain’ is slashing congestion in its hometown. <https://edition.cnn.com/2019/01/15/tech/alibaba-city-brain-hangzhou/index.html>
- [14] Shao, N. (2022). Research on architectural planning and landscape design of smart city based on computational intelligence. *Computational Intelligence and Neuroscience*, 1745593.
- [15] Delbosc, A., Thigpen, C. (2023). Who uses subsidised micromobility? A survey of Lime Access customers. *Australasian Transport Research Forum 2023 Proceedings*.

- [16] Sawers, P. (2020). *Lime uses sensor data to keep scooters off sidewalks*. Machine Learning Times. <https://www.predictiveanalyticsworld.com/machinelearning-times/lime-uses-sensor-data-to-keep-scooters-off-sidewalks/10871>
- [17] Sawers, P. (2020). *Lime uses sensor data to keep scooters off sidewalks*. Venture Beat. <https://venturebeat.com/ai/lime-uses-sensor-data-to-keep-scooters-off-sidewalks>
- [18] The Lime Times. (n.d.). *Lime Vision tech to keep e-scooters moving in the bike lane, not on sidewalks*. Retrieved April 27, 2025, from: <https://www.li.me/blog/lime-vision-tech-to-keep-e-scooters-moving-in-the-bike-lane-not-on-sidewalks>
- [19] Wajeetongratana, P. (2023). Intelligent transportation systems as a factor of strategic transportation planning. *E3S Web of Conferences*, 389(1).
- [20] International Association of Public Transport. (2025). *Artificial intelligence in public transport. Knowledge brief 2025*. https://www.uitp.org/wp-content/uploads/sites/7/2025/08/20250325_Artificial-Intelligence-in-Public-Transport.pdf
- [21] Mobility Innovators. (2021). *LTA Singapore installed AI-powered Transit Bus Surveillance Solution*. <https://mobility-innovators.com/lta-singapore-installed-ai-powered-transit-bus-surveillance-solution>
- [22] Tjoe, L. N. (2023). *North-South, East-West MRT lines to get AI-powered system to help improve reliability by end-2024*. The Straits Times. <https://www.straitstimes.com/singapore/transport/north-south-east-west-mrt-lines-to-get-ai-powered-system-to-help-improve-reliability-by-end-2024>
- [23] Land Transport Authority. (n.d.). *Intelligent transport systems*. Retrieved April 30, 2025, from: https://www.lta.gov.sg/content/ltagov/en/getting_around/driving_in_singapore/intelligent_transport_systems.html

Implementing automation in distribution centers: a review of case studies

Wojciech Tarasiuk

International Department of Logistics

and Service Engineering

Faculty of Engineering Management

Białystok University of Technology

wojciech.tarasiuk@pb.edu.pl

Abstract: The paper analyzes selected case studies of automation implementation in distribution centers, focusing on solutions such as ASRS systems (automated storage and retrieval systems), ACR (autonomous case handling) robots, AMRs (autonomous mobile robots), and goods to person technologies. It presents what kind of technologies were applied by companies like Renault, ASICS, dm-drogerie markt, SF-DHL, and Keller Logistic, demonstrating their impact on improving operational efficiency, increasing storage density, and shortening order fulfillment times.

Key words: automation, distribution centers, case studies, logistics

1. Introduction

The development of logistics has always been closely connected to the use of machines and technology. From early innovations like the steam engine and the forklift to modern robotic systems used for picking and packing goods, each step has aimed to make work faster, easier, and more efficient. Although today's interest in automation seems very strong, it is not entirely new – it continues a long history of improving warehouse and transport processes through technology [1].

Warehouses and distribution centers face ongoing challenges such as inconsistent processes, poor information flow, inventory inaccuracies, and limited operational capacity. These issues affect daily efficiency and can lead to delays, errors, and financial losses. Addressing them requires practical changes supported by well-matched technological solutions [2].

The goal of the study is to examine how automation technologies are applied in distribution centers by analyzing selected case studies. The focus is on identifying the types of technologies used and the outcomes they helped achieve. To achieve this, the study addresses the following research questions: What types of automation technologies may be used in distribution centers? and What effects of automation implementation have been reported in the analyzed distribution centers?

2. The role of automation in distribution centers

Key functions of distribution centers (DCs) are receiving goods, storing them, picking and packing products into logistics units and dispatching them [3]. Goods receipt is the initial stage of the warehousing process, involving the receipt, identification and documentation of goods [4]. Storage of goods refers to the organized placement and management of products within a warehouse [5]. While picking is related to the process of selecting individual articles or packaging units from storage for orders, packing involves preparing these selected items for shipment [6]. Finally, dispatching is considered as a last step of processes in DCs, during which products are transported safely to points of sale or individual customers [3].

The literature indicates that the first high-bay automated warehouses were built some fifty years ago. The pace of development has accelerated since then [7]. The integration of automation within warehouse logistics has undergone substantial transformation due to the advent of digitalization and the deployment of advanced technologies [8]. One of the current trends on the DHL Trend Radar is Indoor Mobile Robots. It refers to the development and deployment of various types of autonomous, movable robotic systems designed to perform tasks within indoor environments, typically without direct human intervention, while often operating in a cooperative or collaborative manner [9].

Examples of solutions that automate work in distribution centers include automated storage and retrieval systems (ASRS), goods to person systems (G2P), automated guided vehicles (AGVs), autonomous mobile robots (AMRs), and robotic arms. ASRS refers to a type of automated system designed to store and retrieve products or materials in a warehouse or distribution center. Typical components of that technology include storage racks (where the goods are stored), automated machines such as cranes or shuttles (for moving items) and software that manages the operation of the system [10]. Pick-to-Light is a complete order-picking support system in which electronic light indicators and displays show the operator the location and quantity of products to be retrieved. Once confirmed, the signal turns off. Put-to-Light, on the other hand, operates in the opposite direction. The indicators show the locations where the already picked items should be placed, which is particularly useful during the order consolidation or replenishment phase [11]. Another technology is G2P which transport goods (typically in containers or trays) to designated pick stations to allow pickers choose the right item according to picking order. This contrasts with person-to-goods (P2G) systems, where pickers travel to the items [12]. AGVs are a relatively similar solution to AMRs. First of them follow predefined paths using fixed guidance systems, while AMRs navigate dynamically using sensors, allowing them to adapt to changing environments and obstacles without fixed routes [13]. However, a robotic arm is a reprogrammable, multifunctional manipulator designed to perform work alone or assist humans in repetitive tasks, such as pick and place operation [14].

3. Methodology

This study is based on a comparative analysis of selected case studies describing the implementation of automation technologies in distribution centers. The research process consisted of four main steps. First, a broad search of publicly available materials was conducted to identify real-world examples of automation implementation. The search focused on company case study repositories, professional reports, and project descriptions published by technology providers. Second, five case studies were selected based on the following criteria:

- diversity of technologies used (e.g., AMR, shuttle systems, goods-to-person solutions),
- global distribution (cases from various countries and regions),
- availability of information on implementation outcomes.

Third, the selected cases were analyzed with a focus on two main dimensions: the type of automation technology applied and the reported effects of the implementation (e.g., productivity gains, error reduction, operational challenges). Finally, the findings were summarized in a comparative table which presents key aspects of each implementation.

4. Case studies analysis

The first case study is the implementation of STAMH's solutions in the distribution center of the Keller Logistic company in Romania. In the case described, advanced warehouse automation technologies were used. The first solution is the self-supporting racking system, which consists of racks more than 35 meters high and more than 70 meters long. They were designed to operate in two cold chambers, one of which operates at temperatures from +5°C to -22°C and the other to -27°C. An additional 4 Cracker Cranes were used, which handle pallets weighing up to 1 ton, ensuring fast storage and retrieval of goods in the high rack. The receiving and dispatching zones combine with pallet conveyor system stacker cranes to transport pallets through special airlocks to the inside of the refrigerated chambers. The distribution center also is equipped with an automatic pallet control station, which checks weight and contour of the pallet before stacking. The results of the implementation in this case study are increased safety and improved operational efficiency. However, information on quantitative indicators is lacking [15].

In a case study of a dm-drogerie markt distribution center in Wustermark (Germany), advanced warehouse automation technologies were implemented by Swisslog. Technologies used include a high-bay warehouse, which is operated by special Ventura stacker cranes – this allows pallets to be quickly placed and retrieved from specific locations. Automatic depalletizers and a case buffer allow goods

to be prepared for picking by separating them into individual units and storing them temporarily before further processing. ACPaQ was also deployed, which is an automated system that uses KUKA robots to create mixed pallets containing different products to suit the layout of individual stores. In addition, 15 picking stations have been implemented, of which seven are fully automatic and eight are manually operated. When it comes to the benefits of implementing automation in the case of this distribution center, higher operational efficiency, reduced workload for employees, a decrease in order errors and an increase in the speed of order processing are mentioned [16, 17].

Another example of implementing automation in logistics is the solutions prepared by KNAPP for the ASICS distribution center in Garons, France. The case study focuses on two systems: OSR Shuttle™ Evo, which is an advanced shuttle system, and Pick-it-Easy workstations, which are ergonomic picking stations using the goods-to-person principle. The OSR Shuttle™ Evo system is an automated storage and retrieval system. Goods are stored in totes or cartons weighing up to 50 kg. The system uses intelligent shuttle robots that move along the racks, storing and retrieving goods as required. Once the goods are delivered to the Pick-it-Easy station, the appropriate number of items are retrieved by an employee. Pick-to-light systems are used at the station, as well as weight and image inspection to verify the correctness of the picked items. The effects of the implementation included increased productivity per employee, reduced errors in logistics processes, and shorter lead times [18–20].

A further described case of automation implementation also took place in France. Exotec streamlined processes at Renault Group's distribution center in Villeroy. The technologies used there include the Skypod® system, which is an advanced ASRS system. In this solution, autonomous mobile robots move both vertically and horizontally. They are responsible for delivering containers of goods to the high-bay racks, as well as moving containers from the racks to the picking stations. These stations are also part of logistics automation, improving inventory traceability and stock management. Exotec added several specialized machines to work with the Skypod® system in order to improve workflow and increase automation. These included two machines for forming cartons, two for closing them, and 30 ergonomic grippers. In addition, two stations have been prepared for the replenishment of goods, which enable the delivery of goods to the high-bay racks with the help of AMRs. In the case study, the results of the implementation include a reduction in order processing time from 120 minutes to 15, a fourfold increase in order processing productivity and a reduction in errors, as well as a 99.7% customer service satisfaction rate [21, 22].

The last case of AMRs usage is the solution prepared by HAI ROBOTICS for the SF-DHL distribution center in Shanghai, China. There are 9 AMRs used, which the supplier refers to as ACRs (Autonomous Case-handling Robots). They are characterized by the fact that they only move horizontally, while they have

high racks and can pick several containers at the same time from different heights on a single rack 4 meters high. Also, part of logistics automation solutions are automated on-robot picking workstations, where operators pick goods from containers delivered by robots and then put them on put-to-light shelves to form a specific order. The results of the implementation include a 20-fold increase in the efficiency of goods receipt, and a 3.5-fold increase in the efficiency of order picking. In addition, picking accuracy of 99,99% was achieved [23, 24]. The outcomes are summed up in Table 1.

Table 1. Cross-case studies analysis

No.	Technology supplier	Technology user	Solutions used	Implementation effects
1.	STAMH	Keller Logistic (3PL)	stacker cranes; pallet conveyor system; automatic pallet control station	higher safety; improved operational efficiency
2.	Swisslog	dm-drogierie markt (beauty and care)	automatic stacker cranes; automatic depalletizers; case buffer; automatic palletizers; KUKA robots; automatic picking stations	higher operational efficiency; workload of employees reduced; order errors decreased; the speed of order processing increased
3.	KNAPP	ASICS (footwear)	ASRS system; AMRs; shuttle system; picking stations; pick-to-light	productivity per employee increased; errors in logistics processes reduced; lead times shorter
4.	Exotec	Renault Group (automotive)	ASRS system; AMRs; picking stations; forming cartons machines; closing cartons machines; goods replenishment stations	higher operational efficiency; the speed of order processing increased; errors in logistics processes reduced
5.	HAI ROBOTICS	SF-DHL (3PL)	AMRs; automated picking stations; put-to-light shelves	goods receipt productivity increase; order picking increase; very high accuracy of picking

Source: own studies.

Regardless of the technology supplier or type of technology, the implementation of solutions that automate operations in distribution centers brings clear benefits in terms of operational efficiency. Increasing order picking accuracy and reducing errors is a common factor in the effects of implementations, which may suggest that technologies such as AMR, G2P, pick-to-light or automated picking stations effectively support improvements in customer service. Automation implementations

have also helped relieve the burden on manual workers, which adds value in the context of today's staffing and ergonomic challenges.

5. Conclusions

The study addresses two research questions. First, what types of automation technologies may be used in distribution centers? The analysis indicates that distribution centers implement a wide range of solutions, including ASRS systems, AMRs, robotic picking stations but also less complex solutions such as pallet conveyors and automatic pallet control stations. Second, what effects of automation implementation have been reported in the analyzed distribution centers? Reported effects include increased operational efficiency, higher picking accuracy, reduced errors, improved space utilization, and shorter order processing times. Moreover, the study reports reduction of employees' workload. The article includes some limitations, among which are the lack of a quantitative assessment of the impact of the automation technologies used on operational efficiency and the absence of an analysis of the organizational context and implementation conditions in the cases described.

In the further stages of the research, the author intends to focus on comparing the effectiveness of various automation technologies used in distribution centers, with a particular focus on their impact on selected operational indicators, such as efficiency, accuracy and flexibility of warehouse processes. It is also planned to deepen the analysis of the organizational context of deployments, including the digital maturity of enterprises and the degree of integration of automation systems with existing logistics processes. Another important direction will be the identification of factors determining the effectiveness of the implementation of technological solutions depending on the industry, scale of operations and supply chain structure.

Literature

- [1] Yaseen, A., Kalyan, B. S. (2022). PLC/SCADA based product sorting and logistics warehouse handling automation. In *2022 International Conference on Recent Trends in Microelectronics, Automation, Computing and Communications Systems (ICMAACC)* (pp. 1–6).
- [2] Ambrosio-Flores, K. L., Lazo-de-la-Vega-Baca, M., Quiroz-Flores, J. C., Cabrera-Gil-Grados, E. (2022). Warehouse management model integrating BPM-Lean Warehousing to increase order fulfillment in SME distribution companies. In *Proceedings of the 8th International Engineering, Sciences and Technology Conference* (pp. 17–24).
- [3] Rios, J., Linfati, R., Morillo-Torres, D., Derpich, I., Gatica, G. (2021). Optimal placement design for picking and packing in distribution centers. *Advances in Mechanical Engineering*, 13(4), 1–7.

- [4] Kulińska, E., Giera, J. (2019). Identification and analysis of risk factors in the process of receiving goods into the warehouse. *Foundations of Management*, 11(1), 103–118.
- [5] Tudor, F., Budica, A. B., Budica, I., Budica, A. F. (2014). Storage – integral component of the logistic system. *Annals of the University of Craiova, Economic Sciences Series*, 1(42), 99–106.
- [6] Sundram, V. P. K., Ibrahim, I., Esa, M. M., Azly, N. N. M. (2019). The issues in order picking and packaging in a leading pharmaceutical company in Malaysia. *International Journal of Supply Chain Management*, 8(6), 1055–1061.
- [7] de Koster, R. (2018). Automated and robotic warehouses: Developments and research opportunities. *Logistics and Transport*, 38(2), 33–40.
- [8] Li, P. (2024). Machinery and logistics: Development trends and prospects of automated warehouse technology. *Applied and Computational Engineering*, 65, 81–88.
- [9] DHL. (n.d.) *Logistics trend radar. Insights. Shaping tomorrow*. Retrieved April 22, 2025, from: <https://www.dhl.com/pl-en/home/innovation-in-logistics/logistics-trend-radar.html>
- [10] Dhaliwal, A. (2020). The rise of automation and robotics in warehouse management. In V. Garg, R. Agrawal (Eds.), *Transforming management using artificial intelligence techniques*. CRC Press.
- [11] *Pick To Light system: What is it and how does it work?* (n.d.). AR-Racking. Retrieved October 6, 2025, from: <https://www.ar-racking.com/en/blog/pick-to-light-system-what-is-it-how-does-it-work-and-when-should-it-be-used>
- [12] Bozer, Y. A., Aldarondo, F. J. (2018). A simulation-based comparison of two goods-to-person order picking systems in an online retail setting. *International Journal of Production Research*, 56(11), 3838–3858.
- [13] Norton, A., Gavriel, P., Yanco, H. (2019). A standard test method for evaluating navigation and obstacle avoidance capabilities of AGVs and AMRs. *Smart and Sustainable Manufacturing Systems*, 3(2), 106–126.
- [14] Low, Z. H., Ishak, M. H. I., Idris, N. H. (2019). Robotic arm control using Internet of Things (IoT). *Elektrika: Journal of Electrical Engineering*, 18(3–2), 51–55.
- [15] STAMH. (2024). *Warehouse Automation for pallets in the distribution center of a leading logistics company*. <https://stamh.com/projects/warehouse-automation-for-pallets-in-the-distribution-center-of-a-leading-logistics-company>
- [16] Swisslog. (2020). *dm-drogerie markt opens a new distribution center in Germany: with robotics & software from Swisslog*. <https://www.swisslog.com/en-us/about-swisslog/newsroom/news-press-releases-blog-posts/2020/07/the-dm-drogerie-markt-is-opening-a-new-distribution-center-in-wustermark>
- [17] *Case Study dm-drogerie markt, Wustermark*. (n.d.). Retrieved April 29, 2025, from: <https://www.swisslog.com/nb-no/case-studies-a-white-papers/case-studies-og-referanser/2024/05/dm-drogerie-markt-germany>

- [18] KNAPP. (n.d.). *ASICS: Leading the race with innovative storage solutions*. Retrieved April 29, 2025, from: <https://www.knapp.com/en/insights/case-studies/asics-leading-the-race-with-innovative-storage-solutions>
- [19] KNAPP. (n.d.). *Shuttle storage system for efficient order fulfillment*. Retrieved April 29, 2025, from: <https://www.knapp.com/en/evo>.
- [20] KNAPP. (n.d.). *Ergonomic work stations and paperless picking*. Retrieved April 4, 2025, from: <https://www.knapp.com/en/solutions/technologies/modern-work-stations-for-satisfied-employees>
- [21] Exotec. (n.d.). *Renault group slashes order time from 120 to 15 minutes*. Retrieved April 30, 2025, from: <https://www.exotec.com/case-studies/renault-group-case-study>
- [22] Exotec. (n.d.). *Solving for the total warehouse inside the AS/RS*. Retrieved April 30, 2025, from: <https://www.exotec.com/skypod-automated-storage-retrieval-system>
- [23] HAIROBOTICS. (n.d.). *SF-DHL supply chain*. Retrieved April 30, 2025, from: <https://www.hairobotics.com/cases/sf-dhl-apparel>
- [24] HAIROBOTICS. (n.d.). *Case study SF-DHL supply chain China*. PDF downloaded April 30, 2025, from: <https://www.hairobotics.com/cases/sf-dhl-apparel>

Parki naukowo-technologiczne – przegląd metod oceny oraz propozycja wskaźników ewaluacyjnych

Bartłomiej Użyński

Szkoła doktorska

Wydział Inżynierii Zarządzania

Politechnika Białostocka

bartlomiej.uzynski@sd.pb.edu.pl

Abstract: The article presents a comprehensive review of methods used to assess the performance of science and technology parks and highlights the lack of a unified evaluation framework. In response, the author proposes a quantitative model based on 32 indicators grouped into six key areas. Developed in collaboration with representatives of Polish science parks, the model aims to enable more consistent, multi-dimensional, and comparable assessments of park performance.

Key words: science and technology parks, evaluation of the activities of science and technology parks, start-ups, support for startups

1. Wstęp

Parki naukowo-technologiczne stanowią istotne ogniwo ekosystemu innowacji, umożliwiające efektywną współpracę pomiędzy nauką a sektorem gospodarczym. Ich funkcjonowanie opiera się na tworzeniu warunków sprzyjających rozwojowi startupów, transferowi technologii i inkubacji przedsięwzięć wysokiego ryzyka. Za interesowanie instytucjami wspierającymi przedsiębiorczość opartą na wiedzy systematycznie wzrasta, zarówno wśród badaczy, jak i decydentów. Sukces słynnych spontanicznych klastrów, takich jak Dolina Krzemowa i Route 128, sprawił, że wiele rządów krajowych i regionalnych zainwestowało w tworzenie parków naukowo-technologicznych jako narzędzi polityki technologicznej i innowacyjnej. Przykładami mogą być rządy Tajwanu [1], Japonii [2], Brazylii [3] czy Włoch [4]. W ciągu ostatnich 15 lat liczba parków naukowo-technologicznych na całym świecie wzrosła mniej więcej dwukrotnie [5].

Chociaż literatura szeroko omawia rolę parków naukowo-technologicznych w stymulowaniu lokalnego i regionalnego rozwoju gospodarczego, zagadnienie pomiaru efektywności ich działalności wciąż pozostaje niedostatecznie rozwinięte. Dotychczasowe podejścia koncentrują się najczęściej jedynie na wybranych aspektach

działalności parków lub bazują na danych cząstkowych, co utrudnia porównywalność wyników oraz ogranicza ich użyteczność dla praktyki zarządczej i polityki publicznej.

W kontekście powyższych wyzwań pojawia się potrzeba opracowania spójnej, kompleksowej metody oceny działalności parków naukowo-technologicznych, która uwzględniałaby ich złożoność organizacyjną i wielowymiarowy charakter oddziaływania. Niniejszy artykuł ma na celu przedstawienie przeglądu istniejących metod oceny efektywności parków naukowo-technologicznych, identyfikację ich ograniczeń oraz zaproponowanie autorskiego zestawu wskaźników opartych na danych ilościowych i konsultacjach z przedstawicielami wybranych polskich parków.

2. Parki naukowo-technologiczne i ich rola

Analiza literatury w przedmiocie działalności parków naukowo-technologicznych i metod ich oceny wymaga na wstępie wyjaśnienia stosowania pojęć, takich jak park naukowy, park naukowo-technologiczny, park badawczy czy park biznesowy. Terminy te używane są w literaturze przedmiotu zamiennie, pomimo różnych celów i charakterystycznych cech tych podmiotów [6, 7, 8].

O parku naukowo-technologicznym możemy mówić wtedy, gdy:

- bazuje na prawnie uregulowanej i wyodrębnionej, samodzielnie zarządzanej nieruchomości, obejmującej konkretny teren i/lub budynki wraz z infrastrukturą techniczną;
- ma koncepcję zagospodarowania terenu należącego do parku oraz plan rozwoju w obszarze aktywności naukowo-badawczej i produkcyjnej związanej z kreacją nowej wiedzy i technologii;
- ma formalne powiązania z instytucjami naukowo-badawczymi i edukacyjnymi, lokalną i regionalną administracją publiczną, działającymi w regionie instytucjami wspierania przedsiębiorczości i transferu technologii oraz finansowania ryzyka (ang. *venture capital*);
- stwarza możliwości korzystania przez przedsiębiorców z nieruchomości oraz infrastruktury technicznej na zasadach umownych;
- oferuje usługi w zakresie doradztwa, transferu technologii oraz rozwoju przedsiębiorstw zlokalizowanych w obrębie nieruchomości [9].

W kilku istniejących artykułach można znaleźć informacje na temat wyników i dynamiki rozwoju poszczególnych parków [10–12] lub grup parków [13, 14]. Wielu badaczy zajmowało się rolą odgrywaną przez parki w krajowej i regionalnej gospodarce, koncentrując się na różnych aspektach. Autorzy zidentyfikowali m.in. następujące role: wspieranie regionalnego wzrostu i konkurencyjności [15, 16], pełnienie funkcji pomostowej i ułatwianie transferu wiedzy pomiędzy różnymi podmiotami [17–19], w szczególności uniwersytetami [20, 21], czy też unowocześnianie gospodarki kraju i systemu innowacji [22, 23].

3. Wybrane metody oceny działalności parków naukowo-technologicznych

Ocena efektywności działalności parków naukowo-technologicznych stanowi złożone wyzwanie badawcze, wynikające z braku konsensusu w literaturze dotyczącego jednoznacznej definicji sukcesu tych instytucji. Jednym z podstawowych problemów w ocenie parków naukowo-technologicznych jest zróżnicowanie ich celów i zadań. Aby móc rzetelnie ocenić ich efektywność, konieczne jest wcześniejsze określenie i uzgodnienie kluczowych celów danej jednostki, a następnie dokonanie oceny jej działalności na podstawie zestawu odpowiednio dobranych wskaźników efektywności.

Przedmiotem dotychczasowych analiz badawczych była ocena oddziaływania parków naukowo-technologicznych na funkcjonowanie przedsiębiorstw rezydujących na ich terenie. Początki oceny działalności parków naukowo-technologicznych sięgają 1988 roku, kiedy to w Wielkiej Brytanii pierwsze badania w tym zakresie przeprowadzili Monck i współautorzy. Analizowali oni wpływ parków na firmy w nich zlokalizowane, porównując ich wyniki z przedsiębiorstwami działającymi poza parkami. W badaniu zastosowano metodę doboru porównawczego uwzględniającą różne wskaźniki efektywności, takie jak współpraca z uczelniami i instytucjami szkolnictwa wyższego, intensywność działalności B+R, liczba zgłoszeń patentowych, wprowadzanie nowych produktów i usług oraz wskaźniki przetrwania i upadłości firm. Wyniki badania pokazały jednak, że dowody na lepszą efektywność firm funkcjonujących w parkach naukowych w porównaniu do tych spoza nich są ograniczone [24]. Lindelöf i Löfsten wykazali, że chociaż różnice między firmami zlokalizowanymi w parkach a tymi spoza parków są nieistotne pod względem liczby patentów, rezultatów działalności B+R oraz wdrażania nowych produktów i usług, to jednak przedsiębiorstwa funkcjonujące w parkach wykazują większy potencjał innowacyjny, szybszy wzrost zatrudnienia, wyższe przychody ze sprzedaży oraz większą rentowność w porównaniu do firm spoza parków [25]. Badanie przeprowadzone przez Colombo i Delmastro miało na celu ocenę skuteczności parków naukowo-technologicznych we Włoszech. Autorzy zastosowali metodę doboru porównawczego, analizując próbę 45 firm działających w parkach, porównując je z odpowiednio dobranymi firmami funkcjonującymi poza parkami. Głównym przedmiotem analizy były nowe firmy oparte na technologiach (NTBFs – *new technology-based firms*), których działalność często wiąże się z wysokim poziomem innowacyjności oraz intensywną współpracą z sektorem nauki. Wyniki badania wykazały, że firmy działające w parkach osiągają wyraźnie wyższe tempo wzrostu w porównaniu do swoich odpowiedników funkcjonujących poza parkami. Parki okazały się szczególnie skuteczne w przyciąganiu przedsiębiorców o wysokich kwalifikacjach oraz w stymulowaniu ich współpracy z instytucjami szkolnictwa wyższego (HEIs – *higher education institutions*). Oznacza to, że parki nie tylko wspierają rozwój firm technologicznych, ale również pełnią istotną funkcję w tworzeniu ekosystemów innowacji poprzez

wzmacnianie powiązań między nauką a biznesem. Badanie Colombo i Delmastro dostarczyło istotnych dowodów empirycznych na pozytywny wpływ parków na rozwój nowych firm opartych na nowych technologiach [26].

W ocenie funkcjonowania parków naukowo-technologicznych zastosowanie znalazła również matryca wskaźników efektywności. Jej zasadniczym celem było zidentyfikowanie najważniejszych atrybutów skutecznego działającego parku technologicznego z punktu widzenia różnych grup interesariuszy, takich jak uczelnie wyższe, jednostki samorządu terytorialnego, instytucje rządowe i agencje rozwoju, a także przedsiębiorcy i inwestorzy prywatni. W ramach badań wykorzystano ponad 120 mierników odnoszących się do różnych perspektyw oceny. Należy jednak zaznaczyć, że matryca została opracowana z myślą o parkach znajdujących się na etapie dojrzałości, co stanowi istotne ograniczenie tego narzędzia [27].

4. Propozycja wskaźników ewaluacyjnych

W odpowiedzi na zidentyfikowane w literaturze przedmiotu luki badawcze autor opracował propozycję wskaźników służących do oceny działalności parków naukowo-technologicznych. Została ona oparta na analizie istotności wskaźników przeprowadzonej na podstawie wywiadów telefonicznych z ekspertami – przedstawicielami wybranych polskich parków. Opracowany zestaw wskaźników ma charakter ilościowy i obejmuje łącznie 32 wskaźniki, pogrupowane w sześć kluczowych obszarów funkcjonowania parków. Wskaźniki te odnoszą się do:

- ogólnej charakterystyki parku, uwzględniającej m.in. długość jego funkcjonowania oraz wielkość i wykorzystanie infrastruktury;
- profilu firm-lokatorów;
- poziomu innowacyjności;
- zakresu i wartości świadczonych usług proinnowacyjnych;
- kwalifikacji kadry pracowniczej;
- aktywności w pozyskiwaniu funduszy;
- współpracy z jednostkami naukowymi, uczelniami wyższymi i funduszami kapitałowymi.

Tabela 1. Wskaźniki oceny działalności parków naukowo-technologicznych

Wskaźniki	Jednostka miary
Ogólna charakterystyka parków naukowo-technologicznych	
Ile lat park funkcjonuje na rynku?	lata
Powierzchnia biurowa parku	m ²
Stopień zagospodarowania powierzchni biurowej parku	%
Liczba laboratoriów działających w parku	liczba
Stopień zagospodarowania powierzchni laboratoryjnej	%

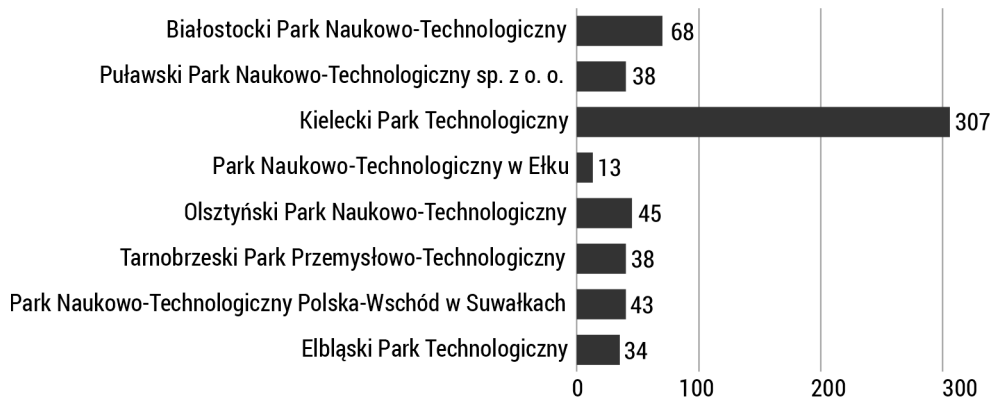
Wskaźniki	Jednostka miary
Wskaźniki charakteryzujące lokatorów parku	
Liczba firm-lokatorów parku	liczba
Liczba startupów	liczba
Liczba firm dojrzałych	liczba
Średnia liczba pracowników firm w ostatnim zakończonym roku kalendarzowym	liczba
Średnia liczba wynalazków zgłoszonych przez firmy w ostatnim roku kalendarzowym	liczba
Średnia liczba innych zgłoszeń przedmiotów praw własności przemysłowej w ostatnim roku kalendarzowym	liczba
Wskaźniki dotyczące usług świadczonych przez park	
Liczba usług proinnowacyjnych oferowanych przez park	liczba
Liczba usług proinnowacyjnych oferowanych przez park nieodpłatnie	liczba
Liczba wyświadczonych usług proinnowacyjnych w ostatnim zakończonym roku kalendarzowym	liczba
Wartość wyświadczonych usług proinnowacyjnych w ostatnim zakończonym roku kalendarzowym	zł
Liczba klientów parku, którzy skorzystali z usług proinnowacyjnych w ostatnim zakończonym roku kalendarzowym	liczba
Wskaźniki dotyczące kwalifikacji pracowników parku	
Liczba pracowników parku ogółem	liczba
Liczba pracowników parku świadczących usługi proinnowacyjne	liczba
Liczba pracowników parku świadczących usługi proinnowacyjne ze stopniem/tytułem dr, dr hab. lub prof.	liczba
Liczba pracowników parku świadczących usługi proinnowacyjne z wykształceniem technicznym	liczba
Liczba pracowników ze znajomością języków obcych na poziomie zaawansowanym	liczba
Wskaźniki charakteryzujące aktywność parku w zakresie pozyskiwania funduszy	
Środki finansowe pozyskane na rzecz wspierania lokatorów przez park w ostatnim ukończonym roku kalendarzowym	zł
Liczba realizowanych projektów w ostatnim ukończonym roku kalendarzowym	liczba
Liczba projektów inkubacyjnych/akceleryacyjnych w ostatnim ukończonym roku kalendarzowym	liczba
Liczba firm, które ukończyły projekty inkubacyjne/akceleryacyjne w ostatnim zakończonym roku kalendarzowym	liczba
Wartość wy świadczonej pomocy <i>de minimis</i> na najem w ostatnim ukończonym roku kalendarzowym	zł
Wartość wy świadczonej pomocy <i>de minimis</i> na inne usługi w ostatnim ukończonym roku kalendarzowym	zł
Wskaźniki dotyczące sieciowania parku	
Liczba sieci i organizacji branżowych, do których należy park	liczba
Z iloma uczelniami współpracuje park?	liczba

Wskaźniki	Jednostka miary
Z iloma jednostkami naukowymi, takimi jak np. PAN czy instytuty badawcze, współpracuje park?	liczba
Z iloma funduszami kapitałowymi współpracuje park?	liczba
Ile certyfikatów (takich jak np. certyfikat S00iPP, czyli Stowarzyszenia Organizatorów Ośrodków Innowacji i Przedsiębiorczości w Polsce, ISO) posiada park?	liczba

Źródło: opracowanie własne.

Poniższe wykresy prezentują kilka wybranych wartości wskaźników w poddanych badaniom ankietowym parkach naukowo-technologicznych zlokalizowanych w Polsce wschodniej. Dane dotyczą stanu na 31 grudnia 2024 roku. Uzyskane wartości wszystkich 32 wskaźników pozwolą na porównanie badanych parków, a także zbadanie korelacji pomiędzy wskaźnikami.

Na rysunku 1 przedstawiono liczbę firm-lokatorów działających w badanych parkach naukowo-technologicznych w Polsce wschodniej. Dane te wskazują na istotne zróżnicowanie potencjału parków pod względem liczby rezydentów.

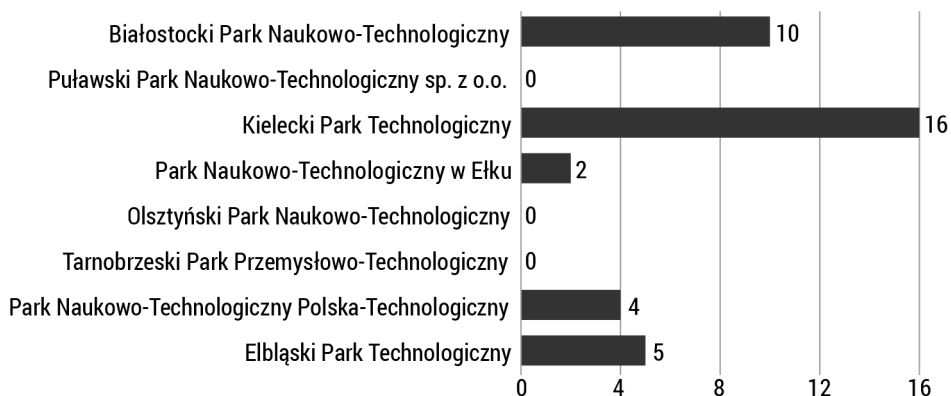


Rysunek 1. Liczba firm-lokatorów danego parku

Źródło: opracowanie własne.

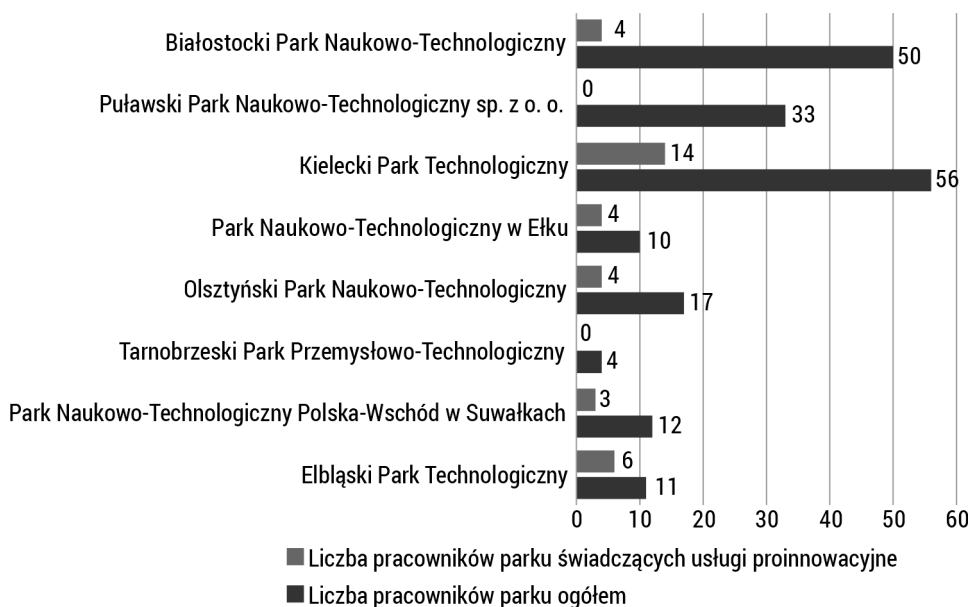
Rysunek 2 prezentuje liczbę usług proinnowacyjnych oferowanych przez parki w badanym okresie. Widać wyraźnie, że niektóre z nich oferują szeroki wachlarz usług, podczas gdy inne koncentrują się jedynie na podstawowym wsparciu.

Jak pokazano na rysunku 3, badane parki różnią się istotnie zarówno pod względem liczby pracowników ogółem, jak i liczby osób świadczących usługi proinnowacyjne. Wysoki udział personelu zaangażowanego w tego typu działania może świadczyć o silnej orientacji parku na wsparcie merytoryczne i rozwój innowacji wśród rezydentów. Z kolei w parkach, w których odsetek ten pozostaje niski, możliwe jest występowanie modelu działalności opartego w większym stopniu na wynajmie infrastruktury niż na świadczeniu zaawansowanych usług doradczych czy badawczych.



Rysunek 2. Liczba usług proinnowacyjnych oferowanych przez dany park

Źródło: opracowanie własne.



Rysunek 3. Pracownicy parków ogółem oraz pracownicy świadczący usługi proinnowacyjne

Źródło: opracowanie własne.

Przedstawione wyniki tworzą spójny zestaw narzędzi do oceny funkcjonowania parków naukowo-technologicznych. Ich zastosowanie w badaniach empirycznych umożliwia zarówno analizę porównawczą parków, jak i identyfikację mocnych i słabych stron ich działalności.

5. Podsumowanie

Artykuł przedstawia przegląd wybranych metod oceny działalności parków naukowo-technologicznych, które obejmują badania porównawcze firm funkcjonujących w parkach i poza nimi, wykorzystanie matryc wskaźników efektywności oraz analizy uwzględniające perspektywy różnych interesariuszy, takich jak uczelnie, samorządy czy inwestorzy. Autor zwraca uwagę na istotne ograniczenia istniejących podejść, takie jak fragmentaryczność i niekompletność danych, brak jednolitego i kompleksowego systemu oceny oraz trudności w porównywaniu wyników pomiędzy różnymi parkami, zwłaszcza, że wiele metod skupia się na parkach w fazie dojrzałości, pomijając ich wcześniejsze etapy rozwoju.

W odpowiedzi na zidentyfikowane luki autor proponuje zestaw 32 wskaźników pogrupowanych w sześć kluczowych obszarów funkcjonowania parków. Zestaw ten, opracowany we współpracy z ekspertami z polskich parków technologicznych, ma umożliwić bardziej kompleksową, spójną oraz porównywalną ocenę parków na różnych etapach ich rozwoju.

Zaproponowany zestaw 32 wskaźników, mimo że obejmuje kluczowe obszary funkcjonowania parków naukowo-technologicznych, posiada pewne ograniczenia. Wskaźniki mają charakter ilościowy i w mniejszym stopniu odzwierciedlają aspekty jakościowe, takie jak satysfakcja lokatorów, jakość sieciowania czy długoterminowy wpływ parków na ekosystem innowacji.

W przyszłości warto uzupełnić omawiany zestaw o wskaźniki jakościowe, obejmujące m.in. poziom satysfakcji lokatorów, jakość współpracy z partnerami czy postrzeganie parku w ekosystemie innowacji. Zastosowanie metod jakościowych, takich jak ankiety i studia przypadku, pozwoliłoby uzyskać pełniejszy obraz funkcjonowania parków.

Literatura

- [1] Hu, T.-S., Lin, C.-Y., Chang, S.-L. (2005). Technology-based regional development strategies and the emergence of technological communities: A case study of HSIP, Taiwan. *Technovation*, 25(4), 367–380.
- [2] Bass, S. J. (1998). Japanese research parks: National policy and local development. *Regional Studies*, 32(5), 391–403.
- [3] de Mello, J. M. C., Rocha, F. C. A. (2004). Networking for regional innovation and economic growth: The Brazilian Petrópolis technopole. *International Journal of Technology Management*, 27(5), 488–497.
- [4] Landoni, P., Scellato, G., Catalano, G. (2010). Science parks contribution to scientific and technological local development: The case of AREA science park trieste. *International Journal of Technology. Policy and Management*, 10(1–2), 36–52.

- [5] Lecluyse, L., Knockaert, M., Spithoven, A. (2019). The contribution of science parks: A literature review and future research agenda. *The Journal of Technology Transfer*, 44(2), 559–595.
- [6] Sofouli, E., Vonortas, N. S. (2007). S&T parks and business incubators in middle-sized countries: the case of Greece. *Journal of Technology Transfer*, 32, 525–544.
- [7] Link, A. N., Scott, J. T. (2007). The economics of university research parks. *Oxford Review of Economic Policy*, 23(4), 661–674.
- [8] Chan, K. F., Lau, T. (2005). Assessing technology incubator programs in the science park: The good, the bad and the ugly. *Technovation*, 25, 1215–1228.
- [9] Hołub-Iwan, J., Olczak, A., Cheba, K. (2012). *Benchmarking parków technologicznych w Polsce*. Polska Agencja Rozwoju Przedsiębiorczości. https://www.parp.gov.pl/storage/publications/pdf/20121203_130930%20benchmarking_parkow_edycja2012.pdf
- [10] Howard, E. S., Link, A. N. (2019). An oasis of knowledge: The early history of gateway University Research Park. *Journal of the Knowledge Economy*, 10(3), 1037–1063.
- [11] Miao, J. T., Hall, P. (2014). Optical illusion? The growth and development of the optics valley of China. *Environment and Planning C: Government and Policy*, 32(5), 863–879.
- [12] Yan, M. R., Yan, H., Zhan, L., Yan, X., Xu, M. (2020). Evaluation of technological innovations and the industrial ecosystem of science parks in Shanghai: An empirical study. *Science, Technology and Society*, 25(3), 482–504.
- [13] Kim, H.-Y., Jung, C. M. (2010). Does a technology incubator work in the regional economy? Evidence from South Korea. *Journal of Urban Planning and Development*, 136(3), 273–284.
- [14] Yang, D. Y.-R., Hsu, J.-Y., Ching, C.-H. (2009). Revisiting the silicon Island? The geographically varied “strategic coupling” in the development of high-technology parks in Taiwan. *Regional Studies*, 43(3), 369–384.
- [15] Olcay, G. A., Bulu, M. (2016). Technoparks and technology transfer offices as drivers of an innovation economy: Lessons from Istanbul’s innovation spaces. *Journal of Urban Technology*, 23(1), 71–93. <https://doi.org/10.1080/10630732.2015.1090195>
- [16] Zhang, F., Wu, F. (2012). Fostering indigenous innovation capacities: the development of biotechnology in Shanghai’s Zhangjiang high-tech park. *Urban Geography*, 33(5), 728–755.
- [17] Meseguer-Martinez, A., Ruiz-Ortega, M. J., Parra-Requena, G. (2020). The social network of a science park: A study of heterogeneity. *European Journal of International Management*, 14(6), 1095–1118.
- [18] Wicaksono, A., Ririh, K. R. (2021). Understanding technological knowledge spillover in a science technology park ecosystem: An ethnographic study. *Asian*

- Journal of Technology Innovation*. <https://doi-org.bazy.pb.edu.pl/10.1080/19761597.2021.1920843>
- [19] Steruska, J., Simkova, N., Pitner, T. (2019). Do science and technology parks improve technology transfer? *Technology in Society*, 59, 101127. <https://doi-org.bazy.pb.edu.pl/10.1016/j.techsoc.2019.04.003>
 - [20] Gan, Q. Q., Hong, J., Hou, B. J. (2021). Assessing the different types of policy instruments and policy mix for commercialisation of university technologies. *Technology Analysis and Strategic Management*, 33(5), 554–567. <https://doi-org.bazy.pb.edu.pl/10.1080/09537325.2020.1831468>
 - [21] Phongthiya, T., Malik, K., Niesten, E., Anantana, T. (2021). Innovation intermediaries for university-industry R&D collaboration: Evidence from science parks in Thailand. *Journal of Technology Transfer*. <https://doi-org.bazy.pb.edu.pl/10.1007/s10961-021-09902-0>
 - [22] Phelps, N. A., Dawood, S. R. S. (2014). Untangling the spaces of high technology in Malaysia. *Environment and Planning C: Government and Policy*, 32(5), 896–915.
 - [23] Chen, C.-Y., Lin, Y.-L., Chu, P.-Y. (2013). Facilitators of national innovation policy in a SME-dominated country: A case study of Taiwan. *Innovation: Management, Policy & Practice*, 15(4), 405–415.
 - [24] Monck, C. S. P., Porter, R. B., Quintas, P. R., Storey, D. J., Wynarczyk, P. (1989). Science parks and the growth of high technology firms. *Prometheus*, 7(1), 170–171. <https://doi.org/10.1080/08109028908629053>
 - [25] Lindelöf, P., Löfsten, H. (2003). Science parks location and new technology-based firms in Sweden – Implications for strategy and performance. *Small Business Economics*, 20, 245–258.
 - [26] Colombo, M., Delmastro, M. (2002). How effective are technology incubators? Evidence from Italy. *Research Policy*, 31, 1103–1122.
 - [27] Dąbrowska, J. (2011). *Measuring the success of science parks: Performance monitoring and evaluation* [Conference presentation]. XXVIII IASP World Conference on Science and Technology Parks. <https://repositorio.minciencias.gov.co/server/api/core/bitstreams/2bd9c647-b89c-4c0f-993c-3404c98f6ce1/content>

Metoda teorii ugruntowanej w badaniach z zakresu logistyki i zarządzania łańcuchem dostaw

Martyna Wilczewska

Szkoła Doktorska

Politechnika Białostocka

martyna.wilczewska@sd.pb.edu.pl

Abstract: The emergence of supply chain management (SCM) and its integration with other fields of research, such as logistics, has initiated an important line of research that should successfully combine scientific rigor with business utility. The grounded theory method is used to develop scientific theories that meet both needs. This study reviews the current scope of the grounded theory use in logistics and SCM research. Based on the results of the review, a set of 8 recommendations was developed, the application of which can enable the grounded theory method to be used effectively and provide scientifically and practically valuable results.

Keywords: theory development, grounded theory, logistics and supply chain management, logistics theory, supply chain management theory

Wstęp

Kluczowe znaczenie teorii naukowych wynika z ich zdolności do wyjaśniania różnych zjawisk, co pozwala na ich lepsze rozumienie, przewidywanie i podejmowanie praktycznych działań [1]. Jednak, aby realizować to zadanie, zarówno sama teoria, jak i leżący u jej podstaw proces badawczy muszą spełniać kryteria ważności naukowej. W przypadku badań jakościowych kwestia ta od lat 60. XX wieku pozostaje przedmiotem debaty [2], głównie z powodu konieczności pogodzenia rygoru badań z kreatywnością badacza [3]. Odpowiedzią na to wyzwanie była opracowana przez Glasera i Straussa w 1967 roku metoda teorii ugruntowanej (ang. *grounded theory*), bazująca na iteracyjnym procesie zbierania i analizy danych w celu konstruowania teorii [4].

W ciągu ponad 50 lat istnienia teoria ugruntowana stała się jedną z wiodących metod jakościowych w dziedzinach takich jak pielęgniarstwo, psychologia oraz edukacja, a z czasem znalazła również zastosowanie w badaniach z zakresu logistyki i zarządzania łańcuchem dostaw. Ze względu na empiryczny charakter badań i stosunkowo młody wiek tego obszaru badawczego jego rozwój jest niekiedy postrzegany jako oparty na zapożyczonych teoriach, a własne zaplecze teoretyczne jako niewy-

starczające [5]. Szersze zastosowanie metody teorii ugruntowanej może więc stanowić cenny wkład w rozwój nauki, jednak przy założeniu, że opracowane teorie będą spełniać zarówno standardy metodyczne, jak i odpowiadać na potrzeby praktyczne.

Celem niniejszego artykułu jest opracowanie założeń poprawnego metodycznie stosowania metodyki teorii ugruntowanej w logistyce i zarządzaniu łańcuchem dostaw. Badanie oparto na metodzie analizy stanu wiedzy umożliwiającej dokonanie przeglądu dotychczasowych badań, ze szczególnym uwzględnieniem ich aspektów metodycznych, ich ocenę jakościową, identyfikację mocnych i słabych stron oraz sformułowanie rekomendacji skutecznego stosowania metody teorii ugruntowanej w przyjętym obszarze badań. Analizie poddano publikacje indeksowane w bazach Scopus i Web of Science do stycznia 2023 roku.

1. Wprowadzenie do literatury przedmiotu

1.1. Zarządzanie łańcuchem dostaw

Koncepcja zarządzania łańcuchem dostaw (ang. *supply chain management*, SCM) rozwinęła się jako interdyscyplinarny obszar badań powiązany z zarządzaniem strategicznym, zarządzaniem operacjami czy logistyką. Z uwagi na stosunkowo krótki okres rozwoju wciąż badane są zakres i definicja SCM [6], granice SCM jako obszaru badawczego [7] oraz powiązanie z innymi obszarami badawczymi, takimi jak zakupy [8] czy logistyka [9]. W tym ostatnim przypadku wyróżnia się różne szkoły myślenia (SCM to jeden z elementów logistyki; logistyka to jeden z elementów SCM; są to różne nazwy tej samej koncepcji; są to dwa odrębne obszary z wspólnym zakresem). W niniejszym artykule przyjęto drugą z wymienionych perspektyw, co oznacza analizę problematyki badawczej w szerokim kontekście SCM, z naciskiem na komponent logistyczny.

Równolegle toczy się również dyskusja nad statusem SCM jako samodzielnego obszaru badawczego [10], co wynika z jego niewystarczających podstaw teoretycznych. Fundamenty SCM opierają się bowiem w dużej mierze na teoriach rozwiniętych w ramach innych dyscyplin, takich jak ekonomia kosztów transakcyjnych czy teoria zasobowa [11]. Mimo, że „pożyczenie” teorii pozwala na szybszy rozwój wiedzy czy integrację z innymi obszarami nauki [5], rozwój własnych teorii jest kluczowy: zapewnia wiarygodność obszaru badawczego, określa jego granice i stwarza pole do prowadzenia dyskusji [12]. Ograniczeniem dla rozwoju bazy teoretycznej SCM jest jednak dominacja stosowanych podejść ilościowych, co utrudnia opracowywanie i ocenę teorii [13].

W literaturze z zakresu SCM znaleźć można apele o rozwój teorii [13, 14] oraz propozycje rozwiązań i dobrych praktyk, takich jak praktyczne narzędzia służące budowaniu teorii [15] czy też adaptowanie teorii z innych dziedzin [16]. Wskazuje się również na konieczność zachowania równowagi między rygorem naukowym a użytecznością badań [17] i proponuje rozwijanie teorii średniego zasięgu,

dostosowanych do unikalnych kontekstów w obszarze SCM, co może sprzyjać równoważeniu naukowego wymiaru teorii z empirycznym wymiarem praktyki [18]. W ramach tego podejścia istotną rolę może odgrywać metodyka teorii ugruntowanej [19], umożliwiająca opracowywanie teorii na podstawie danych empirycznych.

1.2. Metoda teorii ugruntowanej

Metodyka teorii ugruntowanej została opracowana w latach 60. XX wieku przez socjologów Glasera i Straussa. Zaproponowane podejście polegało na jednoczesnym zbieraniu (tzw. teoretycznym próbkowaniu) i analizie (tzw. kodowaniu) danych, co umożliwiło wprowadzenie elementów rygoru i systematyczności do procesu badań jakościowych [4]. Końcowym efektem procesu badawczego jest w tym przypadku nowa teoria substancyjna (ang. *substantive theory*), która wyjaśnia badane zjawisko w przyjętym kontekście, w oparciu o analizowane dane. Taka teoria może stanowić samodzielny wkład w rozwój wiedzy lub zostać rozwinięta do postaci uniwersalnej, formalnej teorii, ujmującej dane zjawisko w różnych kontekstach.

Z uwagi na różnice poglądów Glaser i Strauss zdecydowali się kontynuować swoje badania nad jej rozwojem niezależnie. Kolejne prace Glasera są postrzegane jako wierne pierwotnym założeniom, natomiast Strauss we współpracy z Corbin rozwinął jej zmodyfikowane podejście [20]. Warto również wspomnieć o tzw. trzecim pokoleniu badaczy metody teorii ugruntowanej – grupie uczniów Glasera lub Straussa, którzy opracowali własne modyfikacje metody. Spośród nich największą popularność zyskało podejście Charmaz [21]. Wszystkie trzy wymienione wersje metody teorii ugruntowanej – autorstwa Glasera, Straussa i Corbin oraz Charmaz – wywodzą się z pierwotnych założeń metody i obejmują wykorzystanie szerokiego zakresu źródeł danych, ich teoretyczne próbkowanie, iteracyjne gromadzenie oraz kodowanie z zastosowaniem techniki stałego porównywania, opracowywanie notatek, a także dążenie do nasycenia teoretycznego. W pozostałych aspektach poszczególne podejścia wykazują jednak istotne różnice [22].

Podczas 50 lat rozwoju metoda teorii ugruntowanej przekształciła się w wiele zróżnicowanych podejść, ale poprawne zastosowanie żadnego z nich nie jest pozbawione wyzwań. Wśród trudności związanych ze stosowaniem metody wskazuje się na cykliczny i nieuporządkowany charakter metodyki oraz pracochłonny i czasochłonny proces badawczy [23]. Dodatkowo badacz musi w jasny i przekonujący sposób zaprezentować iteracyjny proces rozwoju teorii w ramach linearnego układu tekstu narzuconego przez wytyczne dotyczące struktury prac naukowych. Wobec braku prostych rozwiązań umożliwiających przezwycięzenie tych trudności powszechnie przyjmuje się, że zawiłości metody teorii ugruntowanej mogą być łatwiej opanowane, jeżeli badacz dokona starannego wyboru podejścia najlepiej odpowiadającego celom jego badań oraz przyjętym założeniom.

2. Metodyka badań

W celu realizacji założonego celu badawczego zaprojektowano procedurę badawczą opartą na metodzie analizy stanu wiedzy.

Pierwsza faza procesu badawczego obejmowała kompilację zbioru danych – prac naukowych (w tym: artykuły naukowe, prace przeglądowe, materiały konferencyjne, publikacje w trybie *early access* oraz rozdziały książek) indeksowanych w bazach danych Web of Science i Scopus, opublikowanych w języku angielskim do końca stycznia 2023 roku. W wyszukiwaniu zastosowano słowa kluczowe: „logistic*”, „supply chain*”, „SCM” oraz „grounded theor*”. W wyniku wyszukiwania pozyskano zbiór 846 publikacji (Web of Science: 411, Scopus: 435), który następnie poddano dalszej weryfikacji w celu wykluczenia prac niezgodnych z kryteriami doboru. W pierwszym kroku weryfikacji, polegającej na przeglądzie tytułów i abstraktów, wykluczono: 478 prac nieempirycznych (dotyczących metodyki badawczej) oraz niezwiązanych tematycznie, 130 duplikatów (prac pojawiających się w wynikach wyszukiwania w obu bazach danych), a także 10 prac niedostępnych w wersji pełnotekstowej. W drugim kroku weryfikacji, polegającej na przeglądzie pełnych tekstów artykułów, wykluczono 34 prace niezwiązane tematycznie. Ostatecznie, do analizy przygotowano zestaw zawierający 194 prace pełnotekstowe.

W kolejnym etapie przeanalizowano treść prac z wykorzystaniem metody analizy stanu wiedzy, co miało na celu przedstawienie pogłębionego podsumowania dominujących kierunków myślenia w danym obszarze badawczym [24]. W niniejszym badaniu metoda analizy stanu wiedzy obejmuje trzy części: pierwsza dotyczy identyfikacji dobrych i złych praktyk w zakresie stosowania metodyki teorii ugruntowanej w analizowanych badaniach, druga przedstawia inne cechy metodyczne, które pokazują różnorodność podejść w obszarze logistyki i SCM, natomiast trzecia zawiera zestaw wytycznych dotyczących prowadzenia rygorystycznych metodycznie badań, opracowanych na podstawie analizowanych prac.

3. Przebieg i wyniki procesu badawczego

3.1. Dobre i złe praktyki stosowania metody teorii ugruntowanej

Jedną z najlepszych zidentyfikowanych praktyk metodycznych było jasne uzasadnienie wyboru konkretnego podejścia w ramach metodyki teorii ugruntowanej – na przykład podejścia Glasera [25] lub Charmaz [26]. Takie deklaracje dają wgląd w postrzeganie metodyki przez autorów i wskazują na świadome zaprojektowanie procesu badawczego. Na uwagę zasługują również prace zawierające spójny i jasny opis przyjętej metodyki [27] i procesu analitycznego [28]. Ten rodzaj informacji pozwala lepiej zrozumieć rozumowanie autorów podczas opracowywania teorii i umożliwia niezależną ocenę procesu badawczego i uzyskanych wyników.

Inne dobre praktyki dotyczyły ponadprzeciętnej przejrzystości raportowania, szczególnie w odniesieniu do wprowadzonych do metodyki modyfikacji. W ramach tych zmian wymieniano rozdzielenie procesów zbierania i analizy danych z uwagi na konieczność ich uprzedniego przetłumaczenia [29] oraz intensywny harmonogram podróży badaczy [30]. Raportowano również modyfikacje strategii teoretycznego próbkowania i preidentyfikację respondentów z uwagi na ograniczenia czasowe [30]. Zasada nasycenia teoretycznego również była dostosowywana: w niektórych pracach analizę kontynuowano ze względu na chęć przeprowadzenia zaplanowanych wcześniej wywiadów, mimo braku pojawiania się nowych kategorii [31].

Wśród zidentyfikowanych złych praktyk w analizowanych pracach opartych na metodzie teorii ugruntowanej najbardziej widoczne były przypadki ograniczonej reprezentacji tej metodyki. W części przypadków zastosowano inne metody badawcze, takie jak studium przypadku czy analiza danych jakościowych [32], podczas gdy metoda teorii ugruntowanej odnosi się jedynie do przyjętych procedur analizy danych empirycznych. Kolejne wątpliwości metodyczne dotyczą podstawowych założeń metody teorii ugruntowanej, które niekiedy były naruszane już na etapie koncepcyjnym: rezygnacja z generowania teorii [33], opieranie wyników na istniejących teoriach [34] czy też dopasowywanie ich do wcześniej zaplanowanych kategorii analitycznych.

3.2. Inne cechy metodyczne wyróżniające analizowane badania

W trakcie analizy zidentyfikowano również cechy metodyczne analizowanych badań, które mogą zostać określone jako niestandardowe zastosowania metody lub pewne niezrozumienie jej założeń. Często prowadziło to do prób uzasadnienia procesu badawczego za pomocą uniwersalnych zasad prowadzenia badań. Przykładem takiego podejścia było formułowanie zastrzeżeń dotyczących wstępnego charakteru badania i potrzeby rozszerzenia jego zakresu ze względu na ograniczoną liczebność próby [35]. Choć sama chęć rozszerzenia zakresu badań nie jest problematyczna, może równocześnie prowadzić do obniżenia wartości uzyskanych wyników.

Zauważono również liczne odniesienia do metod i technik ilościowych w celu walidacji uzyskiwanych wyników. Wśród nich wymienić można mylne interpretacje nasycenia teoretycznego, rozumianego jako brak pojawiania się nowych odkryć podczas analizy danych. Aby uzasadnić zakończenie procesu zbierania danych, niektórzy autorzy rezerwowali część danych (np. 30%) do testowania nasycenia [36]. Inne przykłady obejmowały zastosowanie ilościowych technik na przykład do ustalenia liczebności próby [37] czy oceny rzetelności wyników [38]. Dość powszechne w analizowanych badaniach było więc łączenie jakościowych elementów analizy danych z metody teorii ugruntowanej z metodami ilościowymi w celu walidacji zrozumienia badanego zjawiska.

3.3. Rekomendacje poprawnego stosowania metody

Ostatnim etapem analizy stanu wiedzy było sformułowanie rekomendacji dotyczących prowadzenia poprawnych metodycznie badań opartych na metodzie teorii ugruntowanej w obszarze logistyki i SCM. Sformułowano osiem wytycznych obejmujących proces badawczy od jego początku (etapu konceptualizacji), poprzez fazę realizacji (projektowanie badania i analiza), aż po zakończenie (opracowanie wyników). Chociaż rekomendacje zostały opracowane na podstawie analizy badań z zakresu logistyki i SCM i są ukierunkowane na rozwój tego obszaru, ich uniwersalny charakter pozwala również na zastosowanie w innych dziedzinach badawczych. W tabeli 1 przedstawiono listę opracowanych rekomendacji.

Pierwsza z rekomendacji, czyli „dobre zrozumienie zasad metody” (1), zakłada, że badacz powinien przystąpić do procesu badawczego z pełnym zrozumieniem zasad metody teorii ugruntowanej. W celu rzetelnej oceny, czy zasady analizy danych właściwe tej metodzie będą odpowiednie dla badania, konieczne może być odwołanie się do literatury źródłowej dotyczącej założeń metody teorii ugruntowanej [4, 20, 21, 39] i przykładów jej zastosowania. Dogłębna znajomość procesu badawczego metody może również pomóc w ocenie, czy badacz posiada niezbędne zasoby, takie jak dane empiryczne i czas na przeprowadzenie badania, lub może wprowadzić uprawnione modyfikacje metody [29, 30].

Tabela 1. Lista rekomendacji dotyczących badań opartych na metodzie teorii ugruntowanej

Faza badań	Rekomendacja
Konceptualizacja	Dobre zrozumienie zasad metody
	Świadomy wybór podejścia metodycznego
Projektowanie	Przestrzeganie głównych zasad metody
	Ostrożne stosowanie innych metod i technik
Analiza	Zapewnienie jasnego opisu procesu badawczego
	Transparentne przedstawienie modyfikacji metody
Formułowanie wyniku	Dążenie do opracowania teorii opartej na danych
	Zaufanie do procesu badawczego i jego wyników

Źródło: opracowanie własne.

Na etapie konceptualizacji badania zaleca się również „świadomy wybór podejścia metodycznego” teorii ugruntowanej (2). W związku z odmiennością założeń poszczególnych podejść [22, 23] istotne jest, aby świadomie wybrać to, które najlepiej odpowiada oczekiwaniom badacza: podejście Glasera zapewniające swobodę interpretacyjną, podejście Straussa i Corbin cechujące się elastycznością i subiektywizmem lub też otwarte, konstruktywistyczne podejście Charmaz. Świadomy wybór

najbardziej kompatybilnej wersji może znacząco usprawnić przebieg procesu badawczego [40].

Po dokonaniu wyboru podejścia proces badawczy powinien być realizowany zgodnie z jego założeniami, co oznacza konieczność „przestrzegania głównych zasad metody” (3). Dotyczy to zarówno ogólnych reguł określonych przez Glasera i Straussa na początku ich prac – takich jak iteracyjne zbieranie i analiza danych [4] – jak i zasad charakterystycznych dla poszczególnych wariantów metody [22]. Ze względu na to, że uznane podejścia do metody teorii ugruntowanej były niezależnie rozwijane, stanowią one dojrzałe i samodzielne metodyki badawcze [41].

Zaleca się również „ostrożne stosowanie innych metod i technik” (4), zaś decyzja o rozszerzeniu przyjętej metodyki powinna wynikać z wymagań danego problemu badawczego [42]. W skrajnym przypadku może dojść bowiem do rozmycia metodycznego, prowadzącego do przyjęcia wzajemnie wykluczających się założeń – na przykład poprzez wykorzystanie metody teorii ugruntowanej do testowania wcześniej sformułowanych hipotez [43]. W sytuacji, gdy metodę teorii ugruntowanej łączy się z innymi, konieczne jest transparentne przedstawienie przyjętej metodyki i wyjaśnienie, w jaki sposób poszczególne metody będą się uzupełniać.

Podczas analizy danych i raportowania wyników należy zapewnić „jasny opis procesu badawczego” (5). W przeciwieństwie do podejść ilościowych, które mogą prowadzić do uzyskania jednoznacznie poprawnych lub błędnych wniosków, wyniki badań opartych na metodzie teorii ugruntowanej są trudne do oceny w tych kategoriach [19]. Nie powinno to jednak skłaniać do rezygnacji z prób wiarygodnego opisu złożonego procesu badawczego, umożliwiającego czytelnikowi jego samodzielną ocenę i weryfikację wiarygodności wyników [43].

Kolejna rekomendacja dotyczy „transparentnego przedstawienia wprowadzonych modyfikacji metody” (6). Chociaż podejścia oparte na metodzie teorii ugruntowanej są postrzegane raczej jako zbiory praktyk niż rygorystyczne algorytmy postępowania, istnieją pewne jednoznacznie kojarzone z nimi zasady [2, 44]. Dopuszczalny zakres swobody interpretacyjnej powinien iść w parze z odpowiedzialnością za transparentne raportowanie procesu badawczego oraz uzasadnianie ewentualnych odstępstw od powszechnie uznawanych norm stosowania tej metody.

Zaleca się jednak, by w ramach tych odstępstw nie rezygnować z „dążenia do opracowania teorii opartej na danych” (7). Ten postulat nabiera szczególnego znaczenia w kontekście SCM w związku z evidentną potrzebą rozwoju wiarygodnych podstaw teoretycznych [13, 14]. W tym przypadku odejście od pierwotnego założenia metody pozbawia ją jednego z fundamentów. Jeśli w efekcie nie powstaje **teoria**, pozostaje jedynie empiryczne **ugruntowanie** rezultatu [45], co może wskazywać na brak uzasadnienia dla wyboru tej metody.

Warto również, aby badacz miał „zaufanie do procesu badawczego i jego wyników” (8). Badania oparte na metodzie teorii ugruntowanej niosą ze sobą liczne wyzwania, w tym ich iteracyjny i nieliniowy charakter oraz konieczność bieżącego dostosowywania podejścia badawczego czy też ograniczania wpływu własnej wiedzy

i doświadczenia na proces badawczy [46]. Jednak metoda ta, ze względu na swoją dojrzałość i bogatą historię zastosowań, jest dobrze przystosowana do skutecznego wykorzystania i daje szansę na uzyskanie satysfakcjonujących wyników.

4. Dyskusja

Celem niniejszego badania było dokonanie przeglądu aktualnego stanu badań nad zastosowaniem metody teorii ugruntowanej w badaniach z zakresu logistyki i SCM. Choć nadrzędnym celem każdego badania naukowego jest poszerzanie stanu wiedzy, aplikacyjny charakter SCM zachęca do równoważenia w nich rygoru naukowego i praktycznej użyteczności. Skutecznym rozwiązaniem może być wykorzystanie metody teorii ugruntowanej, co najlepiej ilustrują efekty analizowanych badań, tj. opracowane rezultaty o charakterze teoretycznym. W tabeli 2 przedstawiono wybrane reprezentatywne przykłady poprawnego metodycznie i skutecznego wykorzystania metody teorii ugruntowanej w badaniach z zakresu logistyki i SCM.

Tabela 2. Przegląd rezultatów teoretycznych opracowanych przy użyciu metody teorii ugruntowanej

Publikacja	Wkład do wiedzy
Gligor i Autry, 2012 [47]	Model powiązań między relacjami osobistymi i biznesowymi w SCM
Kirchoff i in., 2016 [48]	Model zrównoważonego podejmowania decyzji w SCM
Pinnington i in., 2016 [49]	Teoria dysonansu postrzegania wartości wewnętrznej
Fernie i Tennant, 2013 [50]	Teoria nieprzyjęcia zarządzania łańcuchem dostaw
Duarte i in., 2019 [51]	Model dostawy ostatniej mili do slumsów

Źródło: opracowanie własne.

Przedstawione prace obejmują szeroką gamę zagadnień związanych z logistyką i SCM, takich jak relacje w łańcuchach dostaw [47], zrównoważony rozwój łańcuchów dostaw [48] czy zarządzanie różnymi typami łańcuchów dostaw. Autorzy skategoryzowali uzyskane w badaniach rezultaty jako teorie (np. teoria dysonansu postrzegania wartości wewnętrznej [49]), modele teoretyczne lub ramy teoretyczne stanowiące podstawę do dalszego opracowywania tematu. W przypadku kilku z tych prac autorzy zaproponowali również umiejscowienie własnego wkładu w szerszym kontekście uznanych teorii, takich jak teoria instytucjonalna [49, 50].

Przedstawione przykłady pokazują, że poprawne zastosowanie metody teorii ugruntowanej może znacząco wspomóc proces badawczy z uwagi na elastyczny charakter metody. Wykorzystuje się ją zarówno do badania okoliczności praktycznie nieznanymi naukowcom i praktykom [51], jak i do badania bardziej uniwersalnych problemów występujących w różnych branżach [48]. Przyjęcie rzeczywistych do-

świadczeń respondentów jako punktu wyjścia może umożliwić opracowanie brakujących wyjaśnień omawianych zjawisk [51], jak również zakwestionowanie dominujących założeń na ich temat [48]. Ponadto specyfika tej metody umożliwia opracowanie rezultatów, które mogłyby nie być możliwe do uzyskania przy użyciu innych metod. Za przykład niech posłuży tu badanie, w którym identyfikacja dwóch kluczowych kategorii opracowanej teorii była możliwa dzięki analizie języka używanego przez respondentów (tj. ich doboru słów) [50].

Nawet jeśli opracowany rezultat teoretyczny odnosi się jedynie do określonego kontekstu, w kolejnych badaniach można przystosować go również do innych kontekstów badawczych. Dane empiryczne uogólnione do postaci teorii mogą z powodzeniem przekładać skomplikowane problemy związane z logistyką i SCM na język naukowy. Powstałe teorie są mocno zakorzenione w praktyce biznesowej, co znajduje odzwierciedlenie w formułowaniu problemów badawczych oraz potencjale aplikacyjnym wyników. Pokazuje to, że metoda teorii ugruntowanej może pomóc wypełnić istotne luki badawcze, zapewniając jednocześnie przestrzeganie rygoru naukowego.

Podsumowanie

Wykorzystanie teorii ugruntowanej w badaniach związanych z logistyką i SCM stanowi rozwijający się obszar badań, jednak jakość rezultatów opracowanych przy użyciu metody teorii ugruntowanej zależy w dużej mierze od jakości procesu badawczego i dogłębnego zrozumienia zasad stosowanej metody. Poprzez przegląd dotychczas zrealizowanych badań możliwa była identyfikacja zarówno mocnych, jak i słabych stron wykorzystania tego podejścia. Pozwoliło to na dostarczenie rzetelnych, wynikających z obecnego stanu wiedzy wytycznych do przyszłych badań.

Interesujące możliwości odnośnie do przyszłych badań leżą w dalszym eksplorowaniu istniejącego stanu wiedzy, tj. rozwiązań teoretycznych opracowanych z wykorzystaniem metody teorii ugruntowanej w logistyce i SCM. Niniejszy artykuł przedstawia jedynie ich zbiorczą analizę, natomiast ich dalsze zgłębianie może umożliwić m.in. zwiększanie zasięgu poprzez rozszerzanie na inne konteksty badawcze. Dzięki temu więcej ważnych problemów z zakresu logistyki i SCM będzie mogło zyskać ugruntowane naukowo wyjaśnienie, co przyczyni się zarówno do rozwoju stanu wiedzy, jak i praktyki badawczej.

Literatura

- [1] Lynham, S. (2002). The general method of theory-building research in applied disciplines. *Advances in Developing Human Resources*, 4(3), 221–241. <https://doi.org/10.1177/1523422302043002>

- [2] Bryant, A., Charmaz, K. (2007). Grounded theory in historical perspective: An epistemological account In A. Bryant, K. Charmaz (Eds.), *The SAGE handbook of grounded theory* (pp. 31–57). SAGE Publications.
- [3] Whittemore, R., Chase, S. K., Mandle, C. L. (2001). Validity in qualitative research. *Qualitative Health Research*, 11(4), 522–537. <https://doi.org/10.1177/104973201129119299>
- [4] Glaser, B. G., Strauss, A. L. (1967). *The discovery of grounded theory: Strategies for qualitative research*. Aldine Transaction.
- [5] Svensson, G. (2002). The theoretical foundation of supply chain management: A functionalist theory of marketing. *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management*, 32(9), 734–754. <https://doi.org/10.1108/09600030210452422>
- [6] Stock, J. R., Boyer, S. L. (2009). Developing a consensus definition of supply chain management: A qualitative study. *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management*, 39(8), 690–711. <https://doi.org/10.1108/09600030910996323>
- [7] Croxton, K. L., García-Dastugue, S. J., Lambert, D. M., Rogers, D. S. (2001). The supply chain management processes. *The International Journal of Logistics Management*, 12(2), 13–36. <https://doi.org/10.1108/09574090110806271>
- [8] Chicksand, D., Watson, G., Walker, H., Radnor, Z., Johnston, R. (2012). Theoretical perspectives in purchasing and supply chain management: An analysis of the literature. *Supply Chain Management: An International Journal*, 17(4), 454–472. <https://doi.org/10.1108/13598541211246611>
- [9] Larson, P. D., Halldórsson, Á. (2004). Logistics versus supply chain management: An international survey. *International Journal of Logistics Research and Applications*, 7(1), 17–31. <https://doi.org/10.1080/13675560310001619240>
- [10] Harland, C. M., Lamming, R. C., Walker, H., Phillips, W. E., Caldwell, N. D., Johnsen, T. E., Knight, L. A., Zheng, J. (2006). Supply management: Is it a discipline? *International Journal of Operations & Production Management*, 26(7), 730–753. <https://doi.org/10.1108/01443570610672211>
- [11] Defee, C., Williams, B., Randall, W., Thomas, R. (2010). An inventory of theory in logistics and SCM research. *The International Journal of Logistics Management*, 21(3), 404–489. <https://doi.org/10.1108/09574091011089817>
- [12] Ralston, P. M., Schwieterman, M., Bell, J. E., Ellram, L. M. (2023). The building blocks of a supply chain management theory: Using factor market rivalry for supply chain theorizing. *Journal of Business Logistics*, 44(1), 141–159. <https://doi.org/10.1111/jbl.12320>
- [13] Suddaby, R. (2014). Editor's comments: Why theory? *The Academy of Management Review*, 39(4), 407–411.
- [14] Carter, C. R., Rogers, D. S., Choi, T. Y. (2015). Toward the theory of the supply chain. *Journal of Supply Chain Management*, 51(2), 89–97. <https://doi.org/10.1111/jscm.12073>

- [15] Ketchen, D. J., Hult, G. T. M. (2011). Building theory about supply chain management: Some tools from the organizational sciences. *Journal of Supply Chain Management*, 47(2), 12–18. <https://doi.org/10.1111/j.1745-493X.2011.03220.x>
- [16] Gligor, D., Bozkurt, S., Russo, I., Omar, A. (2019). A look into the past and future: Theories within supply chain management, marketing, and management. *Supply Chain Management*, 24, 170–186. <https://doi.org/10.1108/SCM-03-2018-0124>
- [17] Sternberg, H., Mathiassen, L., Carnovale, S., Richey Jr., R. G., Davis-Sramek, B. (2024). Conducting engaged logistics and supply chain research: From real-world problems to journal publication. *Journal of Business Logistics*, 45(2), e12380. <https://doi.org/10.1111/jbl.12380>
- [18] Swanson, R., Goel, L., Francisco, K., Stock, J. (2020). Understanding the relationship between general and middle-range theorizing. *International Journal of Logistics Management*, 31(3), 401–421. <https://doi.org/10.1108/IJLM-04-2019-0120>
- [19] Kaufmann, L., Denk, N. (2011). How to demonstrate rigor when presenting grounded theory research in the supply chain management literature. *The Journal of Supply Chain Management*, 47(4), 64–72. <https://doi.org/10.1111/j.1745-493X.2011.03246.x>
- [20] Corbin, J. M., Strauss, A. L. (1990). Grounded theory research: Procedures, canons, and evaluative criteria. *Qualitative Sociology*, 13(1), 3–21. <https://doi.org/10.1007/BF00988593>
- [21] Charmaz, K. (2006). *Constructing grounded theory: A practical guide through qualitative analysis*. SAGE Publications.
- [22] Walker, D., Myrick, F. (2006). Grounded theory: An exploration of process and procedure. *Qualitative Health Research*, 16(4), 547–560. <https://doi.org/10.1177/1049732305285972>
- [23] Corley, K. (2015). A commentary on “What grounded theory is...”. *Organizational Research Methods*, 18(4), 1–6. <https://doi.org/10.1177/1094428115574747>
- [24] Barry, E. S., Merkebu, J., Varpio, L. (2022). State-of-the-art literature review methodology: A six-step approach for knowledge synthesis. *Perspectives on Medical Education*, 11(5), 281–288. <https://doi.org/10.1007/s40037-022-00725-9>
- [25] Flint, D. J., Golicic, S. L. (2009). Searching for competitive advantage through sustainability: A qualitative study in the New Zealand wine industry. *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management*, 39(10), 841–860. <https://doi.org/10.1108/09600030911011441>
- [26] Evensen, K. B., Hansen, H. (2016). Cooperation and information sharing in institutional food chains. *British Food Journal*, 118(10), 2388–2403. <https://doi.org/10.1108/BFJ-01-2016-0011>

- [27] Gligor, D., Tan, A., Nguyen, T. N. T. (2018). The obstacles to cold chain implementation in developing countries: Insights from Vietnam. *The International Journal of Logistics Management*, 29(3), 942–958. <https://doi.org/10.1108/IJLM-02-2017-0026>
- [28] Virili, F., Ghiringhelli, C. (2019). Automation as management of paradoxical tensions: The role of industrial engineering. In F. Cabitza, C. Batini, M. Magni (Eds.), *Organizing for the digital world* (pp. 7–21). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-90503-7_2
- [29] Centobelli, P., Cerchione, R., Maglietta, A., Oropallo, E. (2023). Sailing through a digital and resilient shipbuilding supply chain: An empirical investigation. *Journal of Business Research*, 158, 113686. <https://doi.org/10.1016/j.jbusres.2023.113686>
- [30] Mollenkopf, D., Russo, I., Frankel, R. (2007). The returns management process in supply chain strategy. *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management*, 37, 568–592. <https://doi.org/10.1108/09600030710776482>
- [31] Srivastava, M., Narayanamurthy, G., Moser, R., Pereira, V., Paille, P. (2021). Supplier's response to institutional pressure in uncertain environment: Implications for cleaner production. *Journal of Cleaner Production*, 286, 124954. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.124954>
- [32] Nath, T., Standing, C. (2010). Drivers of information technology use in the supply chain. *Journal of Systems and Information Technology*, 12(1), 70–84. <https://doi.org/10.1108/13287261011032661>
- [33] AlMaian, R. Y., Needy, K. L., Walsh, K. D., Alves, T. da C. L. (2016). A qualitative data analysis for supplier quality-management practices for engineer-procure-construct projects. *Journal of Construction Engineering and Management*, 142(2), 04015061. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CO.1943-7862.0001046](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CO.1943-7862.0001046)
- [34] Brockhaus, S., Kersten, W., Knemeyer, A. M. (2013). Where do we go from here? Progressing sustainability implementation efforts across supply chains. *Journal of Business Logistics*, 34(2), 167–182. <https://doi.org/10.1111/jbl.12017>
- [35] de Boissieu, E., Kondrateva, G., Baudier, P., Ammi, C. (2021). The use of block-chain in the luxury industry: Supply chains and the traceability of goods. *Journal of Enterprise Information Management*, 34(5), 1318–1338. <https://doi.org/10.1108/JEIM-11-2020-0471>
- [36] Liu, W., Zhang, J., Shi, Y., Lee, P. T.-W., Liang, Y. (2022). Intelligent logistics transformation problems in efficient commodity distribution. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 163, 102735. <https://doi.org/10.1016/j.tre.2022.102735>
- [37] Keramat, M. A., Saeednia, H., Alipour Darvishi, Z., Dehghan Dehnavi, M. A. (2021). Testing and fitting a Maskan bank marketing model using an integrated supply chain approach in the construction and housing industry. *International Journal of Nonlinear Analysis and Applications*, 12(2), 2109–2129. <https://doi.org/10.22075/ijnaa.2021.5350>

- [38] Scheibe, K. P., Blackhurst, J. (2018). Supply chain disruption propagation: A systemic risk and normal accident theory perspective. *International Journal of Production Research*, 56(1–2), 43–59. <https://doi.org/10.1080/00207543.2017.1355123>
- [39] Nazarko, J., Wilczewska, M. (2025). Wprowadzenie do metody teorii ugruntowanej. In J. Nazarko (Ed.), *Metoda teorii ugruntowanej w praktyce badawczej: Studia przypadków* (pp. 9–25). Oficyna Wydawnicza Politechniki Białostockiej. <https://doi.org/10.24427/978-83-68077-91-9>
- [40] Heath, H., Cowley, S. (2004). Developing a grounded theory approach: A comparison of Glaser and Strauss. *International Journal of Nursing Studies*, 41(2), 141–150. [https://doi.org/10.1016/s0020-7489\(03\)00113-5](https://doi.org/10.1016/s0020-7489(03)00113-5)
- [41] Mello, J., Flint, D. J. (2009). A refined view of grounded theory and its application to logistics research. *Journal of Business Logistics*, 30(1), 107–125. <https://doi.org/10.1002/j.2158-1592.2009.tb00101.x>
- [42] Manuj, I., Pohlen, T. (2012). A reviewer's guide to the grounded theory methodology in logistics and supply chain management research. *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management*, 42(8–9), 784–803. <https://doi.org/10.1108/09600031211269758>
- [43] Suddaby, R. (2006). From the editors: What grounded theory is not. *Academy of Management Journal*, 49(4), 633–642. <https://doi.org/10.5465/amj.2006.22083020>
- [44] Charmaz, K., Thornberg, R. (2021). The pursuit of quality in grounded theory. *Qualitative Research in Psychology*, 18(3), 305–327. <https://doi.org/10.1080/14780887.2020.1780357>
- [45] Dougherty, D. (2015). Reflecting on the reflective conversation. *Organizational Research Methods*, 18(4), 606–611. <https://doi.org/10.1177/1094428115597973>
- [46] Manuj, I., Mentzer, J. T. (2008). Global supply chain risk management strategies. *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management*, 38(3), 192–223. <https://doi.org/10.1108/09600030810866985>
- [47] Gligor, D., Autry, C. W. (2012). The role of personal relationships in facilitating supply chain communications: A qualitative study. *Journal of Supply Chain Management*, 48(1), 24–43. <https://doi.org/10.1111/j.1745-493X.2011.03240.x>
- [48] Kirchoff, J. F., Omar, A., Fugate, B. S. (2016). A behavioral theory of sustainable supply chain management decision making in non-exemplar firms. *Journal of Supply Chain Management*, 52(1), 41–65. <https://doi.org/10.1111/jscm.12098>
- [49] Pinnington, B. D., Meehan, J., Scanlon, T. (2016). A grounded theory of value dissonance in strategic relationships. *Journal of Purchasing and Supply Management*, 22(4), 278–288. <https://doi.org/10.1016/j.pursup.2016.04.005>
- [50] Fernie, S., Tennant, S. (2013). The non-adoption of supply chain management. *Construction Management and Economic*, 31(10), 1038–1058. <https://doi.org/10.1080/01446193.2013.830186>

- [51] Duarte, A. L. de C. M., Macau, F., Flores, S. C., Sanches, L. M. (2019). Last mile delivery to the bottom of the pyramid in Brazilian slums. *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management*, 49(5), 473–491. <https://doi.org/10.1108/IJPDLM-01-2018-0008>

Spis tabel

AUTOMATYKA, ELEKTRONIKA, ELEKTROTECHNIKA I TECHNOLOGIE KOSMICZNE

Pole switching in state-feedback control systems

Table 1. System poles for different feedback loops.....	18
---	----

Empirical optimal method

for Lyapunov function synthesis of Fractional-Order Systems

Table 1. The optimized matrices P_1	33
---	----

Zastosowanie uczenia maszynowego

w lokalizacji wewnątrzbudynkowej z wykorzystaniem wskaźnika RSSI

Tabela 1. Zestawienie wartości średnich błędów najlepszych modeli	47
---	----

Tabela 2. Zestawienie wartości maksymalnych błędów.....	47
---	----

Tabela 3. Zestawienie wartości minimalnych błędów.....	48
--	----

Design and 3D printing of biodegradable scaffolds from PLA based material

Table 1. Specifications	63
-------------------------------	----

Comparative study of conventional

and stimuli-responsive hydrogels for bioprinting

Table 1. Comparison of selected conventional hydrogels (not applicable to stimuli) used in 3D/4D bioprinting.....	73
--	----

Table 2. Comparison of selected stimuli-responsive hydrogels (SRHs) for 3D/4D bioprinting.....	74
---	----

Behaviour of sand-gravel mixture in direct shear

Table 1. Index properties of tested and analysed sand-gravel mixtures.....	84
--	----

Table 2. Strength and dilatancy at failure	86
--	----

Table 3. Strength and dilatancy at failure from different theories	89
--	----

INŻYNIERIA MECHANICZNA

The impact of tire profile height and pressure

on driver seat vibrations and the degree of tire grip on the road surface

Table 1. Sample results from accelerometers..... 104

Table 2. Hardware list..... 105

Table 3. Sample results of VTEQ device extracted data.

Suspension test in time domain..... 107

Table 4. Sample results of VTEQ device extracted data.

Suspension test in time domain + normalized data..... 108

Table 5. Tires..... 108

Table 6. Base measurements data..... 110

Table 7. Grip and accelerometers outcome values..... 111

Climate-smart farming with mobile agrivoltaics:

A Polish Case Study on Soybean and Buckwheat under Field Conditions

Table 1. Summary of meteorological and microclimatic parameters

under mobile agrivoltaic installation (MIA)

and control conditions during the 2024 growing season..... 122

INŻYNIERIA ŚRODOWISKA, GÓRNICtwo I ENERGETYKA

Pomiar entalpii przepływającego medium

Tabela 1. Entalpie właściwe wybranych substancji..... 133

Life Cycle Assessment (LCA) of glass/polyester laminates

in laboratory-scale testing

Table 1. Composition of glass/polyester laminates prepared

via the HL and RI methods 142

Table 2. Composition of glass/polyester laminates prepared

via the HL and RI methods 143

Impact of ultraviolet radiation

on skin cell redox balance and Phenolic-Based Photoprotection Strategies

Table 1. Recent research on natural origin compounds

in sunscreen formulations..... 156

NAUKI O ZARZĄDZANIU I JAKOŚCI

Internacjonalizacja przedsiębiorstw

z branży *automotive* w Polsce oczami pracowników

Tabela 1. Konteksty jakości 172

Tabela 2. Definicje internacjonalizacji 173

Tabela 3. Znaczenie poszczególnych motywów umiędzynarodowienia
w polskich przedsiębiorstwach z branży *automotive* 176

Tabela 4. Główne motywacje internacjonalizacji polskich firm
z branży *automotive* 177

Nowoczesne technologie w edukacji zawodowej –

perspektywa uczniów kierunków elektroniczno-mechatronicznych

Tabela 1. Kwalifikacje w poszczególnych zawodach z branży ELM w technikum. 192

Tabela 2. Wybrane elementy niezbędnego wyposażenia szkół
i odpowiadające im pojęcia związane z Przemysłem Przyszłości 194

Tabela 3. Liczba respondentów z podziałem na klasy i zawody 195

Tabela 4. Odsetek uczniów w poszczególnych klasach
deklarujących możliwość pracy z nowoczesnymi technologiami 196

Tabela 5. Deklaracje uczniów dotyczące możliwości pracy
z nowoczesnymi technologiami w podziale na zawody 197

Wdrażanie Celów Zrównoważonego Rozwoju

w strategiach polskich uczelni wyższych

Tabela 1. Nazwy i opisy Celów ZR 207

Application of artificial intelligence

in Intelligent Transport Systems – selected examples

Table 1. Key results of selected AI applications in urban mobility 228

Implementing automation in distribution centers: a review of case studies

Table 1. Cross-case studies analysis 237

Parki naukowo-technologiczne – przegląd metod oceny

oraz propozycja wskaźników ewaluacyjnych

Tabela 1. Wskaźniki oceny działalności parków naukowo-technologicznych 244

Metoda teorii ugruntowanej w badaniach
z zakresu logistyki i zarządzania łańcuchem dostaw

Tabela 1. Lista rekomendacji dotyczących badań
opartych na metodzie teorii ugruntowanej..... 256

Tabela 2. Przegląd rezultatów teoretycznych
opracowanych przy użyciu metody teorii ugruntowanej..... 258

Spis rysunków

AUTOMATYKA, ELEKTRONIKA, ELEKTROTECHNIKA I TECHNOLOGIE KOSMICZNE

Pole switching in state-feedback control systems

Figure 1. General structure of state-space model.....	11
Figure 2. Stability regions of continuous system	11
Figure 3. General structure of switching state-feedback gain system	12
Figure 4. Inverted pendulum QUBE Servo.....	14
Figure 5. Comparison of developed model with real control plant.....	17
Figure 6. The location of system poles for all studied cases	19
Figure 7. Comparison of the responses of the system with KA , KB , and the switched system KAB	19
Figure 8. QUARC library configuration blocks	20
Figure 9. Comparison of simulation K matrix switching and experiment results.....	21

Empirical optimal method for Lyapunov function synthesis of Fractional-Order Systems

Figure 1. Model of a second-order system using the FOMCON toolbox in Simulink.	33
Figure 2. The trajectory of the fractional-order system with $\alpha = 0.85$ and the contour plots of the optimal Lyapunov function	34
Figure 3. The optimal Lyapunov function of the system with order $\alpha = 0.85$	34
Figure 4. The trajectory of the fractional-order system with $\alpha = 0.5$ and the contour plots of the optimal Lyapunov function	35
Figure 5. The optimal Lyapunov function of the system with order $\alpha = 0.5$	35

Zastosowanie uczenia maszynowego w lokalizacji wewnątrzbudynkowej z wykorzystaniem wskaźnika RSSI

Rysunek 1. Schemat rozmieszczenia systemu referencyjnego względem pola roboczego	43
Rysunek 2. Platforma mobilna wraz z lokalizatorem Wi-Fi i HTC Vive Tracker 3.0.....	43
Rysunek 3. Stanowisko pomiarowe.....	44
Rysunek 4. Graficzna reprezentacja algorytmu k-NN dla $k = 3$ oraz $k = 5$	45
Rysunek 5. Reprezentacja graficzna położenia punktów testowych.....	46
Rysunek 6. Zależność średniego błędu położenia od liczby k-sąsiadów	47
Rysunek 7. Histogram błędów położenia dla zestawu testowego, wagi = <i>distance</i> , $k = 7$	49
Rysunek 8. Położenia rzeczywiste i estymowane dla zestawu testowego, wagi = <i>distance</i> , $k = 7$	49

INŻYNIERIA BIOMEDYCZNA

Design and 3D printing of biodegradable scaffolds from PLA based material

Figure 1. Filament maker.....	64
Figure 2. Final product.....	64
Figure 3. Sample dimensions	65
Figure 4. Final design with different infill	66
Figure 5. 3D printed samples with 100% and 75% infill.....	66

Comparative study of conventional and stimuli-responsive hydrogels for bioprinting

Figure 1. A) Monomer, B) Polymer, C) hydrogel precursor, D) crosslinked hydrogel	70
Figure 2. Examples of hydrogels with the same chemical composition, but with different crosslinking methods and mechanical properties: A) Rigid hydrogel: high Young's modulus, dense networks, short chains are interconnected concepts, B) Soft hydrogel: flexible and deformable materials, sparse networks with long chains, connections are rare	70
Figure 3. Stimuli-responsive hydrogels	71

INŻYNIERIA ŁADOWA, GEODEZJA I TRANSPORT

Behaviour of sand-gravel mixture in direct shear

Figure 1.	Particle size distribution curves for tested materials.....	84
Figure 2.	Direct shear test results in a large-scale box on sand mixed with 20% gravel at different relative densities under pressure of 450 kPa in planes: (a) $\tau\sigma\xi - s$; (b) $\xi - s$; (c) $\delta\xi\delta s - s$	85
Figure 3.	Direct shear test results in a large-scale box on sand mixed with 60% gravel at different relative densities under pressure of 450 kPa in planes: (a) $\tau\sigma\xi - s$; (b) $\xi - s$; (c) $\delta\xi\delta s - s$	86
Figure 6.	Taylor's relationship between $(\phi_{\text{peak}} - \phi_r)$ and D_r for sand-gravel mixtures with 20% and 60% gravel content	88
Figure 7.	Houlsby's relationship between $(\phi_{\text{peak}} - \phi_r)$ and D_r for sand-gravel mixtures with 20% and 60% gravel content.....	88

The role of international initiatives

in enhancing biodiversity protection in rail transport

Figure 1.	Hierarchical relationship between policy, plans and strategies/master plans included in the Strategic Planning phase, concept design and project (detailed design) included in Design phase, and impact assessment for transport infrastructure	96
Figure 2.	Possible negative impacts on biodiversity due to maintenance works and operation of a railway line indicated in rEvERsE project.	97
Figure 3.	Animal crossing under the railway line E-75 Rail Baltica "Warsaw-Białystok-Lithuania" border as a habitat connectivity measure implemented during the upgrade co-financed by the CEF.....	98

INŻYNIERIA MECHANICZNA

The impact of tire profile height and pressure

on driver seat vibrations and the degree of tire grip on the road surface

Figure 1.	Sample results from PICO NVH software. 235/70R16 1.6 bar. time domain	106
Figure 2.	Sample results from VTEQ device. 235/70R16 2.4 bar. Suspension test in frequency domain	106
Figure 3.	Sample results from VTEQ device. 235/70R16 2.4 bar. Suspension test in time domain.....	107
Figure 4.	Tire differences	109
Figure 5.	Grip SAE and mean grip.....	112

Figure 6. Delta normalized weight	113
Figure 7. Vector sum mean and RMS value.....	114
Figure 8. Delta accelerometers sum vector value	115
Figure 9. Normalized right side weight during the test	116

Climate-smart farming with mobile agrivoltaics:

A Polish Case Study on Soybean and Buckwheat under Field Conditions

Figure 1. Actual evapotranspiration (ETEC, mm) measured by Eddy Covariance method in MIA and control plots.....	123
Figure 2. Plant density (plants/m ²) of soybean and buckwheat under MIA and control conditions. Mean values based on post-harvest stand counts	123
Figure 3. Plant height (cm) of soybean and buckwheat at flowering stage in MIA and control treatment	124
Figure 4. Leaf Area Index (LAI) values for soybean and buckwheat measured during peak vegetative development Higher values were observed in MIA plots for both crops	124
Figure 5. SPAD index as an indicator of chlorophyll content in soybean and buckwheat under MIA versus control. SPAD values reflect leaf greenness and photosynthetic capacity	125
Figure 6. Photosystem II efficiency (PSII) in soybean and buckwheat grown under MIA and control conditions. Data suggest improved photochemical efficiency under MIA.....	125
Figure 7. Seed yield (dt/ha) of soybean and buckwheat cultivated under MIA and in full sun (control). Data represent plot-scale harvest measurements	126

INŻYNIERIA ŚRODOWISKA, GÓRNICTWO I ENERGETYKA

Pomiar entalpii przepływającego medium

Rysunek 1. Ilustracja do równania ciągłości oraz równania Bernoulliego	133
Rysunek 2. Rurki pomiarowe: a) rurka Pitota, b) sonda mierząca ciśnienie statyczne, c) sonda Prandtla.....	134
Rysunek 3. Graficzne wyjaśnienie ciśnień statycznego, dynamicznego i całkowitego.....	135
Rysunek 4. Rysunek grzejnika konwekcyjnego z oznaczeniami	136

Life Cycle Assessment (LCA) of glass/polyester laminates in laboratory-scale testing	
Figure 1. The progress of the resin infusion process over time	144
Figure 3. Increase in the environmental impact in all studied categories for the laminate prepared via the RI method compared to the HL method (100%)	145
Figure 4. The impact of glass/polyester laminates preparation process via the hand lay-up and resin infusion methods in categories: ecotoxicity, freshwater (12), resource use, fossil fuels (15), and land use (13).....	145
Figure 5. Contribution of individual components to the freshwater ecotoxicity impact category for the laminate: a) prepared via the HL method, b) prepared via the RI method	146
Figure 6. The contribution of impact categories to overall normalization results for laminate: a) prepared via the HL method, b) prepared via the RI method	147
Figure 7. Contribution of elements to overall normalized impact for the laminate: a) prepared via the HL method, b) prepared via the RI method	148
Impact of ultraviolet radiation on skin cell redox balance and Phenolic-Based Photoprotection Strategies	
Figure 1. Three levels of cellular antioxidant protection	152
Figure 2. Sunscreen ingredients classification.....	155
NAUKI O ZARZĄDZANIU I JAKOŚCI	
Internacjonalizacja przedsiębiorstw z branży <i>automotive</i> w Polsce oczami pracowników	
Rysunek 1. Ocena pozycji rynkowej przedsiębiorstw z branży <i>automotive</i> w Polsce	174
Rysunek 2. Ocena nastawienia kierownictwa do procesów umiędzynarodowienia przedsiębiorstwa.....	175
Rysunek 3. Ocena, czy na każdym poziomie zatrudnienia pracownik traktowany jest jako ważny składnik przedsiębiorstwa, mający wpływ na sukces firmy	175

Rysunek 4. Ocena poziomu dojrzałości systemów zarządzania jakością pod względem ważności wynagradzania pracowników i wyrażania uznania za wykonaną pracę	176
Polityka celna jako narzędzie wspierania lokalnej przedsiębiorczości – analiza protekcjonizmu rolnego na przykładzie Polski w ramach UE	
Rysunek 1. Import i eksport zbóż wyrażone w milionach złotych (ceny bieżące)	184
Rysunek 2. Import i eksport warzyw wyrażone w milionach złotych (ceny bieżące)	185
Rysunek 3. Import i eksport mięsa i podrobów jadalnych wyrażone w milionach złotych (ceny bieżące)	186
Rysunek 4. Import i eksport produktów mleczarskich, jaj ptasich, miodu naturalnego i jadalnych produktów pochodzenia zwierzęcego wyrażone w milionach złotych (ceny bieżące)	186
Nowoczesne technologie w edukacji zawodowej – perspektywa uczniów kierunków elektroniczno-mechatronicznych	
Rysunek 1. Odsetek uczniów deklarujących wykorzystanie poszczególnych nowoczesnych technologii na zajęciach	198
Rysunek 2. Znajomość terminologii technologicznej wśród uczniów – dane procentowe.....	199
Rysunek 3. Procentowy rozkład odpowiedzi uczniów na pytanie o znaczenie kompetencji związanych z nowoczesnym przemysłem (4.0/5.0/Przemysłem Przyszłości) dla ich przyszłej kariery zawodowej.....	200
Wdrażanie Celów Zrównoważonego Rozwoju w strategiach polskich uczelni wyższych	
Rysunek 1. Liczba polskich uczelni uwzględniających poszczególne Cele Zrównoważonego Rozwoju w swoich strategiach.....	210
Bariery techniczne, ekonomiczne i organizacyjne w zarządzaniu energią elektryczną	
Rysunek 1. Produkcja i zużycie energii elektrycznej w Polsce w GWh w latach 2018–2024	217

Parki naukowo-technologiczne – przegląd metod oceny oraz propozycja wskaźników ewaluacyjnych	
Rysunek 1. Liczba firm-lokatorów danego parku.....	246
Rysunek 2. Liczba usług proinnowacyjnych oferowanych przez dany park.....	247
Rysunek 3. Pracownicy parków ogółem oraz pracownicy świadczący usługi proinnowacyjne.....	247

