

INNOWACJE W INŻYNIERII ROLNICZEJ



MONOGRAFIA NAUKOWA

pod redakcją

Macieja Kubonia



Polskie Towarzystwo Inżynierii Rolniczej

INNOWACJE W INŻYNIERII ROLNICZEJ

MONOGRAFIA

pod redakcją
prof. dr hab. Macieja Kubonia

Kraków, 2026

Wydawca: Polskie Towarzystwo Inżynierii Rolniczej

Opracowanie redakcyjne:

Mgr inż. Elżbieta Olech

Recenzenci:

Dr hab. inż. Stanisław Parafiniuk prof. Uczelni

– UP Lublin

Dr hab. inż. Jakub Sikora, prof. URK

– URK Kraków

Korekta, łamanie oraz projekt okładki:

Zbigniew Szpila

© Copyright by Polskie Towarzystwo Inżynierii Rolniczej, Kraków 2026

Wydanie I

ISBN 978-83-64377-93-8

Redakcja nie odpowiada za treść i formę materiałów nadesłanych.

Opinie wyrażone w artykułach są wyłącznymi opiniami ich autorów.

Wszelkie prawa zastrzeżone.

Rozpowszechnianie i kopiowanie całości lub części publikacji zabronione bez pisemnej zgody autorów

Druk i oprawa:

NOVA SANDEC

ul. Lwowska 143, 33-300 Nowy Sącz

tel. +48 (18) 547 45 45

e-mail: biuro@novasandec.pl; <http://www.novasandec.pl>

Ark. wyd. 17,10; ark. Druk. 15,25

Nakład: 100 egz.



Wydawnictwo „INŻYNIERIA ROLNICZA”

ul. Balicka 116B

30-149 Kraków

<https://agriceng.org>; e-mail: redakcja@ptir.org

Spis treści

Basara O., Leśniak J., Belcar J., Gorzelany J.: Logistyka i efektywność procesów zbioru, transportu i przechowywania owoców wybranych odmian jabłek	5
Cupiał M., Kulig B.: Cyberbezpieczeństwo w rolnictwie	11
Delimata P., Grochowalski P., Koziół W., Bałuka P.: Big Data w przemyśle, rolnictwie i innych sektorach gospodarki	19
Dzieniszewski G., Sasiela W.: Wybrane problemy implementacji elektromobilności w transporcie	35
Filipkowski J., Skibko Z., Borusiewicz A.: Technologiczne uwarunkowania pracy elektrowni wiatrowych	47
Gajda J.St., Molenda K., Furyk-Grabowska K., Mirski M.: KIMI K2 Thinking jako wsparcie obliczeń śladu węglowego (GHG Protocol) w kontekście Paszportu Baterii UE	59
Gaworski M.: Uwarunkowania efektywności wdrażania automatycznych systemów doju	71
Gorzelany J., Sochacki M., Zardzewiały M., Gajdek G.: Ocena wybranych właściwości mechanicznych i chemicznych owoców wybranych klonów pigwowca japońskiego (<i>chaenomales japonioca</i>)	81
Gródek-Szostak Z., Olech E.: Zarządzanie złożonością łańcuchów dostaw w warunkach geopolitycznego wąskiego gardła: innowacje organizacyjne i lekcje kryzysu w Cieśninie Ormuz	95
Jadwisieńczyk K., Choszcz D., Majkowska-Gadomska J., Krupiński K.: Innowacyjne rozwiązanie ogławiacza do zbioru selera korzeniowego	113
Khaskhachykh M.: Wpływ nawozowych produktów mikrobiologicznych na rozwój korzeni cebuli oraz skuteczność przyjmowania składników odżywczych	121
Kornas R., Olech E.: Struktura kosztów a efektywność funkcjonowania przedsiębiorstw MŚP w Polsce	141
Kraszkiewicz A., Kocira S., Ogrodniczek J., Biernacka B., Góral-Kowalczyk M., Czyżykiewicz M.: Podnoszenie poziomu kształcenia w obszarze inżynierii rolniczej i żywności poprzez intensywny międzynarodowy program kształcenia – studium przypadku projektu „Specialist in agricultural and food engineering in the context of green and digital transformation (twin transition)”	155
Lech K., Masztalerz K., Surma M., Jalozyński K., Nejman M.: Analiza właściwości fizycznych odwadnianych osmotycznie i suszonych jabłek	171
Lis S., Przepióra R., Juszka H.: System automatycznego sterowania urządzeniami gospodarstw domowych w aspekcie profilu pozyskiwanej energii z siłowni fotowoltaicznej	183
Michalek R., Kuboń M.: Etyka w nauce i dydaktyce	191
Olech E.: Uwarunkowania prawne, techniczne i technologiczne funkcjonowania biogazowni w Polsce i UE	203

Pierściński R., Krawczuk A., Kocira S.: Farm Sustainability Assessment w zarządzaniu zrównoważonym łańcuchem dostaw jabłek. Studium przy- padku FMG Dreher	215
Saletnik A., Puchalski C. Saletnik B.: Transformacja sektora odnawialnych źródeł energii w Polsce w latach 2015-2025: kierunki, ograniczenia i pro- gnozy rozwoju	229

LOGISTYKA I EFEKTYWNOŚĆ PROCESÓW ZBIORU, TRANSPORTU I PRZECHOWYWANIA OWOCÓW WYBRANYCH ODMIAN JABŁEK

Oskar Basara¹, Jakub Leśniak¹, Justyna Belcar², Józef Gorzelany¹

¹ Katedra Inżynierii Produkcji Rolno-Spożywczej, Wydział Technologiczno-Przyrodniczy, Uniwersytet Rzeszowski

² Farming Cooperative SAN, Łąka 598, 36-004 Łąka, Polska

Wprowadzenie

Jabłoń (*Malus domestica*) jest najpowszechniejszym gatunkiem drzew owocowych w Polsce. W warunkach polskiego klimatu umiarkowanego uprawiana jest niemal na całym terytorium kraju. Polska zajmuje pozycję lidera w produkcji jabłek w Unii Europejskiej oraz czwarte miejsce na świecie (po Chinach, Turcji i USA) pod względem wielkości produkcji¹. W UE udział Polski w produkcji jabłek stanowi około 30 % zbiorów UE, natomiast globalnie – około 4 %. W ostatnich latach obserwuje się spadek wydajności owoców z 1 ha (np. około -17 % w 2024 r. w porównaniu z 2023 r.), mniejsza wydajność w roku 2024 spowodowana była głównie niekorzystnymi warunkami pogodowymi. Powierzchnia sadów jabłoniowych w Polsce to ok. 150 000-152 000 ha². W strukturze odmian przeważają klasyczne odmiany takie jak Idared, Jonagold, Szampion, Golden Delicious, Gala czy Ligol. W ostatnich latach pojawia się rosnące zainteresowanie odmianami o ciemnopowłokowej skórce (np. mutanty Red Delicious). W nowo zakładanych sadach jabłoniowych w produkcji drzewek najczęściej stosowane są podkładki karłowe, co ułatwia pielęgnację i zbiory³.

Zbiór, transport i magazynowanie stanowią kluczowe etapy mające wpływ na jakość i trwałość owoców. Uszkodzenia mechaniczne podczas zbioru lub transportu skracają okres przydatności jabłek do spożycia i zmniejszają ich wartość handlową. Badania wskazują, że nawet niewielkie urazy (np. stłuczenia czy zgniecenia) prowadzą do pęknięcia ścian komórkowych, utraty płynów międzykomórkowych i pogorszenia jakości zarówno zewnętrznej, jak i wewnętrznej owocu. W nowoczesnych sadach stosuje się technologie minimalizujące te uszkodzenia – przykładowo przenośniki z poduszkami powietrznymi lub odpowiednia regulacja prędkości przenośników i prężności mechanizmów⁴. Odpowiednia logistyka w tym wykorzystanie właściwych sposobów

¹ <https://agridatavalue.eu/index.php/2025/04/30/poland-a-european-leader-in-apple-production>

² Rysz, M., Szymańska, E. J., Wdrażanie innowacji w gospodarstwach sadowniczych o różnej skali produkcji owoców. Zeszyty Naukowe Szkoły Głównej Gospodarstwa Wiejskiego w Warszawie. Ekonomika i Organizacja Logistyki, 8, 73-88, 2023.

³ Statiscites Poland. Preliminary estimate of the main agricultural and horticultural crops in 2024. Agriculture and Environment Department. 31.07.2024, 2024.

⁴ Li Y, Zhang K, Li J, Yang X, Wang P, Liu H., Parameter Optimization and Experimental Study of an Apple Postharvest Damage-Reducing Conveyor Device Based on Airflow Cushioning Technology. Agriculture., 15(8):860, 2025.

zbioru, transportu oraz magazynowania, wpływa nie tylko na zmniejszanie się uszkodzeń mechanicznych mogących wystąpić podczas przechowywania jabłek, ale także na zmianę struktury kosztów oraz opłacalność produkcji jabłek^{5,6}. Przechowywanie jabłek po zbiorze, w tym kontrola parametrów przechowywania, jest ważnym elementem utrzymania jakości owoców i zarządzania późniejszym łańcuchem dostaw do konsumentów.

Celem niniejszych badań było monitorowanie prac związanych ze zbiorem, transportem owoców wybranych odmian jabłek do przechowalni oraz kontrolą ich w okresie przechowywania a także określenie całkowitych kosztów produkcji jabłek oraz opłacalności produkcji z 1 ha.

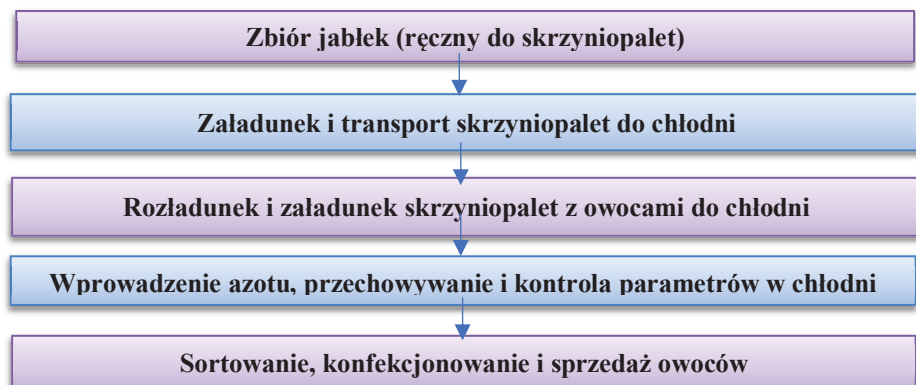
Materiały i metody

Przedmiotem badań była ocena kosztów produkcji oraz procesu logistycznego zbioru, transportu i przechowywania owoców czterech odmian jabłek: Golden Delicious Reinders, Mutsu, Gala Val i Jeromine, w latach 2022-2024. Powierzchnia sadu z badanymi odmianami wynosiła odpowiednio: Mutsu – 0,6 ha, GalaVal – 1,1 ha, Golden Delicious Reinders – 1,85 ha, Jeromine – 2,45 ha. Zakres prac obejmował określenie liczby pracowników i czasu pracy potrzebnych do zbioru owoców z 1 ha, pomiar masy zebranych owoców, analizę struktury kosztów zbioru, transportu i przechowywania oraz ocenę całkowitych kosztów produkcji i opłacalności badanych odmian⁷. Zbiór jabłek w gospodarstwie prowadzono ręcznie przez pracowników sezonowych. Owoce z dolnych partii drzew umieszczano w skrzyniopaletach na wózkach sadowniczych agregatowanych z ciągnikami (rys. 2). Owoce z górnych partii zbierano ręcznie z platformy sadowniczej N.Blosi Carrier (rys. 2) mieszczącej trzy skrzyniopalety, które po napełnieniu przeładowywano na samochód dostawczy i transportowano do przechowalni.

⁵ Rysz, M., & Szymańska, E. J., Wdrażanie innowacji w gospodarstwach sadowniczych o różnej skali produkcji owoców. Zeszyty Naukowe Szkoły Głównej Gospodarstwa Wiejskiego w Warszawie. *Ekonomika i Organizacja Logistyki*, 8, 73-88, 2023.

⁶ Laužikė K., Gudžinskaitė I., Dėnė L. Samuolienė G., The Impact of Growing Conditions on the Shelf Life and Storage Rot of cv. Rubin Apples. *Horticulturae*, 10, 1064, 2024.

⁷ Kowalczyk, J., Podgajny, R., Ekonomiczna ocena produkcji jabłek w wybranym gospodarstwie sadowniczym. *Problemy Inżynierii Rolniczej*, 16, 35-40, 2008.



Rysunek 1. Schemat łańcucha logistycznego, transportu owoców, rozładunku i załadunku owoców do chłodni, sortowania i odbioru owoców z chłodni



Rysunek 2. Ciągnik rolniczy zagregatowany z dwoma wózkami sadowniczymi marki Królik, platforma sadownicza N.Blosi Carrier, na zdjęciu podczas montowania konstrukcji sadowniczej

Skrzyniopalety układano w komorach wózkiem widłowym. Po wypełnieniu komór skrzyniopaletami wprowadzano azot, obniżając poziom tlenu do ok. 1,1%. Dane dotyczące zbioru i transportu wprowadzano do systemu komputerowego. W przechowalni co 180 minut monitorowano temperaturę, poziom tlenu i dwutlenku węgla (utrzymywanych odpowiednio na poziomie 1,1% O₂ i 1,5% CO₂) przy użyciu czujników i płuczki CO₂ marki Gas Systems⁸. Parametry przechowywania utrzymywano bez zakłóceń; komory z owocami wybranych odmian jabłek z 2022 r. otwarto 02.06.2023, a z 2023 r. – 15.05.2024.

⁸Andziak, E., Tomala, K., Sikora, M., Wpływ warunków przechowywania na jakość jabłek ‘Šampion’. Postępy Techniki Przetwórstwa Spożywczego, (2), 27-35, 2009.

Wyniki badań

W latach 2022–2023 w gospodarstwie sadowniczym zebrano odpowiednio 290 960 kg i 324 067 kg jabłek czterech odmian (tab. 1).

Tabela 1. Koszty produkcji owoców analizowanych odmian jabłek w latach 2022 i 2023 w przeliczeniu $\text{zł}\cdot\text{ha}^{-1}$ oraz $\text{zł}\cdot\text{kg}^{-1}$

Lp.	Odmiana	Lata zbioru	Koszty do zbioru	Koszty zbioru	Koszty transportu	Koszty przechowywania	Całkowite Koszty Produkcji
			($\text{zł}\cdot\text{ha}^{-1}$)	($\text{zł}\cdot\text{ha}^{-1}$)	($\text{zł}\cdot\text{ha}^{-1}$)	($\text{zł}\cdot\text{ha}^{-1}$)	($\text{zł}\cdot\text{ha}^{-1}$)
			($\text{zł}\cdot\text{kg}^{-1}$)	($\text{zł}\cdot\text{kg}^{-1}$)	($\text{zł}\cdot\text{kg}^{-1}$)	($\text{zł}\cdot\text{kg}^{-1}$)	($\text{zł}\cdot\text{kg}^{-1}$)
1	GalaVal	2022	29098,95	7695,77	908,36	1889,18	39592,26
			0,77	0,20	0,02	0,05	1,04
		2023	29098,95	5554,18	575,43	1749,95	36978,51
			0,83	0,16	0,01	0,05	1,05
2	Golden Delicious Reinders	2022	28098,95	10218,88	978,49	3130,54	42426,86
			0,45	0,16	0,01	0,05	0,67
		2023	28098,95	9634,28	678,79	3330,49	41742,51
			0,42	0,14	0,01	0,05	0,62
3	Jeromine	2022	29098,95	4889,48	630,54	1978,45	36597,42
			0,74	0,14	0,01	0,05	0,94
		2023	29098,95	7321,8	585,78	2636,82	39643,35
			0,55	0,14	0,01	0,05	0,75
4	Mutsu	2022	23788,01	8681,38	695,58	3052	36216,97
			0,39	0,14	0,01	0,05	0,59
		2023	23788,01	8385,87	896,98	2761,33	35832,19
			0,43	0,15	0,02	0,05	0,65

Średni plon z 1 ha wynosił od 36 391,36 kg (Gala Val) do 64 610,27 kg (Golden Delicious Reinders). Koszty zbioru, transportu i przechowywania wahały się od 0,20 do 0,25 $\text{zł}\cdot\text{kg}^{-1}$, przy czym największy udział stanowiła robocizna, a najmniejszy – transport. Na wyposażeniu gospodarstwa znajduje się instalacja fotowoltaiczna o mocy 26 kW co znacząco zminimalizowało koszty energii elektrycznej. Całkowite koszty produkcji wynosiły od 35 832,20 $\text{zł}\cdot\text{ha}^{-1}$ (Mutsu) do 42 426,90 $\text{zł}\cdot\text{ha}^{-1}$ (Golden Delicious Reinders), natomiast jednostkowe koszty produkcji mieściły się w zakresie 0,59–1,05 $\text{zł}\cdot\text{kg}^{-1}$. Przychody ze sprzedaży w latach 2022–2023 wykazały zróżnicowanie wynikające z różnic w plonach i cenach skupu. Najwyższy przychód uzyskano dla odmiany Golden Delicious Reinders dzięki wysokiemu plonowi i korzystnej cenie sprzedaży, natomiast najniższy z odmiany Gala Val, która mimo wysokiej ceny jednostkowej za kg jabłek charakteryzowała się najmniejszym plonem. Średni dochód z 1 ha wahał się od 40 688,26 zł (Gala Val, wskaźnik efektywności ekonomicznej = 2,06) do 97 891,49 zł (Golden Delicious Reinders, wskaźnik = 3,33) (tab. 2).

Tabela 2. Koszty produkcji owoców analizowanych odmian jabłek w latach 2022 i 2023 w przeliczeniu zł·ha⁻¹

Lp.	Odmiana	Lata zbioru	Całkowite koszty produkcji (zł·ha ⁻¹)	Przychód z produkcji jabłek (zł·ha ⁻¹)	Zysk (zł·ha ⁻¹)	Efektywność ekonomiczna
1	GalaVal	2022	39592,3	83066,68	43474	2,1
		2023	36978,5	74880,6	37902	2,02
		Średnia	38285,39b	78973,64a	40688,26a	2,06a
2	Golden Delicious Reinders	2022	42426,9	137557,8	95131	3,24
		2023	41742,5	142394,5	100651,99	3,41
		Średnia	42084,69c	139976,17c	97891,49d	3,33d
3	Jeromine	2022	36597,4	78446,57	41849	2,14
		2023	39643,4	114665	75022	2,89
		Średnia	38120,39b	96555,78b	58435,39b	2,52b
4	Mutsu	2022	36217	100653,3	64436	2,78
		2023	35832,2	98239,17	62407	2,74
		Średnia	36024,58a	99446,21b	63421,63c	2,76c
5	Średnia z odmian	2022	38708,38a	99931,09a	61222,71a	2,57a
		2023	38549,14a	107544,81b	68995,67b	2,77b

Średnie wartości w kolumnie oznaczone różnymi literami wykazują istotne różnice ($p < 0,05$) zgodnie z testem LSD (litery a do d oznaczają od najmniejszej do największej średnie wartości kosztów)

Oplacalność produkcji owoców w dużych sadach jest zależna od poszczególnych etapów produkcji (łańcucha logistycznego), stanowiska produkcji, a także doboru odpowiedniej odmiany^{9,10}. Uzyskane wyniki potwierdzają, że zintegrowane i racjonalne zarządzanie procesem logistycznym zbioru, transportu i przechowywania jabłek stanowi kluczowy czynnik zwiększający efektywność ekonomiczną i opłacalność produkcji sadowniczej.

⁹ Szymanska, E. J., Rysz, M., Analysis of the production potential and the economic and financial situation of fruit farms in the Małopolska and Pogórze regions. *Więś i Rolnictwo*, 201(4), 79-102, 2024

¹⁰ Zmarlicki, K., Brzozowski, P., Oplacalność produkcji jabłek w zależności od gęstości nasadzeń. *Scientific Journals of the International Academy of Applied Sciences in Lomza*, 82(2), 47-57, 2021

Podsumowanie

Zarządzanie procesem logistycznym w gospodarstwie okazało się kluczowym elementem wpływającym na końcową efektywność ekonomiczną produkcji. Odpowiednia organizacja zbioru, transportu i przechowywania jabłek pozwoliła na optymalne wykorzystanie zasobów ludzkich i technicznych oraz ograniczenie przestoju w pracy. Zastosowanie dwóch zestawów transportowych (ciągnik z wózkami sadowniczymi) zapewniło ciągłość procesu zbioru, natomiast wykorzystanie platformy sadowniczej umożliwiło sprawne pozyskiwanie owoców z górnych partii drzew. W efekcie ograniczono straty surowca wynikające z uszkodzeń mechanicznych oraz nadmiernego czasu między zbiorem a schłodzeniem owoców.

Sprawny system transportu wewnętrznego i dobrze zorganizowany proces przechowywania, obejmujący kontrolę temperatury oraz poziomu tlenu i dwutlenku węgla, pozwoliły utrzymać wysoką jakość owoców przez cały okres magazynowania. Dzięki precyzyjnemu monitorowaniu warunków przechowalniczych nie odnotowano strat jakościowych ani ilościowych, co przełożyło się bezpośrednio na wzrost przychodów ze sprzedaży.

Bibliografia

- Andziak, E., Tomala, K., Sikora, M., Wpływ warunków przechowywania na jakość jabłek 'Šampion'. *Postępy Techniki Przetwórstwa Spożywczego* (2), 27-35, 2009.
- Kowalczyk, J., Podgajny, R., Ekonomiczna ocena produkcji jabłek w wybranym gospodarstwie sadowniczym. *Problemy Inżynierii Rolniczej*, 16, 35-40, 2008.
- Laužikė K., Gudžinskaitė I., Dėnė L. Samuolienė G., The Impact of Growing Conditions on the Shelf Life and Storage Rot of cv. Rubin Apples. *Horticulturae*, 10, 1064, 2024.
- Li Y, Zhang K, Li J, Yang X, Wang P, Liu H., Parameter Optimization and Experimental Study of an Apple Postharvest Damage-Reducing Conveyor Device Based on Airflow Cushioning Technology. *Agriculture*, 15(8):860, 2025.
- Rysz, M., Szymańska, E. J., Wdrażanie innowacji w gospodarstwach sadowniczych o różnej skali produkcji owoców. *Zeszyty Naukowe Szkoły Głównej Gospodarstwa Wiejskiego w Warszawie. Ekonomika i Organizacja Logistyki*, 8, 73-88, 2023.
- Statistices Poland. Preliminary estimate of the main agricultural and horticultural crops in 2024. Agriculture and Environment Department. 31.07.2024, 2024.
- Szymanska, E. J., Rysz, M., Analysis of the production potential and the economic and financial situation of fruit farms in the Małopolska and Pogórze regions. *Więś i Rolnictwo*, 201(4), 79-102, 2024.
- Zmarlicki, K., Brzozowski, P., Oplacalność produkcji jabłek w zależności od gęstości nasadzeń. *Scientific Journals of the International Academy of Applied Sciences in Łomża*, 82(2), 47-57, 2021.
- <https://agridatavalue.eu/index.php/2025/04/30/poland-a-european-leader-in-apple-production>

Adres do korespondencji: oskarb@dokt.ur.edu.pl

ORCID: Oskar Basara 0000-0001-7672-5209

ORCID: Justyna Belcar 0000-0002-2306-8716

ORCID: Józef Gorzelany 0000-0002-1028-097X

CYBERBEZPIECZEŃSTWO W ROLNICTWIE

Michał Cupiał^{1,2}, Bogdan Kulig^{2,3}

¹ Katedra Inżynierii Produkcji Logistyki i Informatyki Stosowanej, Uniwersytet Rolniczy w Krakowie

² Centrum Badawczo Rozwojowe Rolnictwa 4.0, Uniwersytet Rolniczy w Krakowie

³ Katedra Agroekologii i Produkcji Roślinnej, Uniwersytet Rolniczy w Krakowie

Wprowadzenie

Rolnictwo w ostatnich dekadach uległo znaczącej transformacji technologicznej. Wprowadzenie systemów precyzyjnego rolnictwa, automatyzacji oraz analizy danych pozwala na optymalizację produkcji i ograniczenie kosztów. Jednak rosnące uzależnienie od technologii informatycznych sprawia, że sektor ten staje się coraz bardziej podatny na cyberataki¹. Technologie takie jak czujniki IoT, satelitarne systemy nawigacyjne, platformy zarządzania gospodarstwem czy autonomiczne maszyny rolnicze zwiększają wydajność, ale jednocześnie powodują rosnącą zależność sektora od infrastruktury cyfrowej. W konsekwencji każda awaria, błąd konfiguracyjny lub celowy atak może zakłócić nie tylko pojedynczy proces produkcyjny, lecz także cały łańcuch dostaw żywności.

Rolnictwo jest uznawane za jeden z szesnastu sektorów infrastruktury krytycznej, a jego cyfryzacja sprawia, że staje się strategicznym celem dla cyberprzestępców i grup sponsorowanych przez państwa. Według danych Check Point Research, w sierpniu 2025 roku odnotowano 101-procentowy wzrost liczby incydentów w rolnictwie w porównaniu z rokiem ubiegłym². Ataki te nie uderzają jedynie w finanse gospodarstw, ale zagrażają bezpieczeństwu żywnościowemu. Sektor ten postrzegany jest jako "łatwy cel" ze względu na niższą dojrzałość cybernetyczną w porównaniu do sektora finansów, przemysłu czy IT. Wynika to między innymi z ograniczonych budżetów na zabezpieczenia, mniejszej świadomości zagrożeń oraz rozproszonego charakteru infrastruktury, która obejmuje zarówno urządzenia terenowe, jak i systemy zdalnego zarządzania. W praktyce oznacza to, że rolnictwo staje się obszarem szczególnie podatnym na ransomware, phishing, sabotaż systemów automatycznych oraz ataki na łańcuch dostaw. Z tego względu analiza cyberbezpieczeństwa w rolnictwie ma dziś nie tylko znaczenie techniczne, ale także gospodarcze i strategiczne.

¹ Sjaak Wolfert et al., „Big Data in Smart Farming – A review”, *Agricultural Systems* 153 (maja 2017): 69–80, <https://doi.org/10.1016/j.agry.2017.01.023>.

² rohann@checkpoint.com, „Global Cyber Threats August 2025: Agriculture in the Cross-hairs”, *Check Point Blog*, 11 września 2025, <https://blog.checkpoint.com/research/global-cyber-threats-august-2025-agriculture-hit-hard/>.

Rolnictwo 4.0 a zagrożenia cybernetyczne

Rozwój technologii cyfrowych w rolnictwie obejmuje wiele obszarów, takich jak Internet Rzeczy (IoT), systemy GPS i GIS, drony oraz systemy zarządzania gospodarstwem (FMS)^{3,4}. Technologie te umożliwiają gromadzenie i analizę danych w czasie rzeczywistym⁵, co znacząco zwiększa efektywność produkcji⁶. W literaturze zjawisko to określane jest często mianem Rolnictwa 4.0, czyli modelu produkcji opartego na integracji systemów cyberfizycznych, automatyzacji, analityki danych oraz komunikacji sieciowej pomiędzy urządzeniami i platformami zarządzającymi⁷. Dzięki temu możliwe staje się podejmowanie decyzji produkcyjnych w sposób bardziej precyzyjny, szybki i oparty na danych, co obejmuje między innymi sterowanie nawożeniem, monitoring stanu gleby, zarządzanie nawodnieniem oraz planowanie zbiorów. Cyfrowy charakter tych procesów powoduje jednak, że tradycyjne ryzyka operacyjne zostają rozszerzone o zagrożenia typowe dla środowisk teleinformatycznych.

Jednocześnie integracja tych rozwiązań tworzy nowe powierzchnie ataku dla cyberprzestępców. W szczególności urządzenia IoT, często pozbawione zaawansowanych mechanizmów zabezpieczeń, stanowią istotne źródło ryzyka⁸. Problem ten wynika z kilku nakładających się czynników, takich jak stosowanie domyślnych haseł, brak regularnych aktualizacji oprogramowania, niewystarczające szyfrowanie transmisji danych oraz ograniczone możliwości wykrywania naruszeń bezpieczeństwa. W warunkach gospodarstwa rolnego dodatkowym utrudnieniem jest rozproszenie infrastruktury, ponieważ czujniki, stacje pogodowe, systemy nawadniania i maszyny autonomiczne działają często w terenie otwartym, z wykorzystaniem łączności bezprzewodowej, co zwiększa podatność na przechwycenie komunikacji lub nieuprawnioną ingerencję. W efekcie pojedyncze, słabo zabezpieczone urządzenie może stać się punktem wejścia do systemu zarządzania całym gospodarstwem.

W związku z powyższym, w sektorze rolniczym można wyróżnić kilka kategorii zagrożeń, do których można zaliczyć m.in.:

- ataki ransomware blokujące dostęp do systemów,
- nieautoryzowany dostęp do danych produkcyjnych,
- sabotaż automatycznych systemów,
- ataki na łańcuchach dostaw,
- phishing skierowany do pracowników.

³ Erwin Kristen et al., „Security Assessment of Agriculture IoT (AIoT) Applications”, *Applied Sciences* 11, nr 13 (2021): 5841, <https://doi.org/10.3390/app11135841>.

⁴ Milton Campoverde-Molina i Sergio Luján-Mora, „Cybersecurity in smart agriculture: A systematic literature review”, *Computers & Security* 150 (marca 2025): 104284, <https://doi.org/10.1016/j.cose.2024.104284>.

⁵ Wolfert et al., „Big Data in Smart Farming – A review”.

⁶ European Union Agency for Cybersecurity., ENISA Threat Landscape 2022: July 2021 to July 2022. (Publications Office, 2022), <https://doi.org/10.2824/764318>.

⁷ Hang Thanh Bui et al., „Agriculture 4.0 and beyond: Evaluating cyber threat intelligence sources and techniques in smart farming ecosystems”, *Computers & Security* 140 (maja 2024): 103754, <https://doi.org/10.1016/j.cose.2024.103754>.

⁸ Ioanna Kampouraki, *Foresight Cybersecurity Threats for 2030 – Update, 2030*.

Każda z tych kategorii oddziałuje na inny wymiar funkcjonowania gospodarstwa lub przedsiębiorstwa rolnego. Ataki ransomware mogą czasowo unieruchomić systemy planowania produkcji, rozliczeń, logistyki lub zarządzania stadem, prowadząc do przestojów i strat finansowych. Sabotaż systemów automatycznych jest szczególnie niebezpieczny, ponieważ dotyczy bezpośrednio procesów fizycznych, takich jak dozowanie wody, środków ochrony roślin, paszy lub sterowania temperaturą w obiektach inwentarskich. Ataki na łańcuch dostaw mogą prowadzić do zakłóceń nie tylko na poziomie pojedynczego gospodarstwa, lecz także przetwórstwa, magazynowania i dystrybucji produktów rolnych. Wymienione zagrożenia mogą prowadzić do poważnych zakłóceń operacyjnych. Przykładowo, przejście kontroli nad systemem nawadniania może docelowo skutkować zniszczeniem upraw⁹ a atak na system doju w konsekwencji zagraża zdrowiu i życiu zwierząt¹⁰.

Skala konsekwencji zależy przy tym nie tylko od rodzaju ataku, lecz również od stopnia zaawansowania systemów cyfrowych w gospodarstwie. Im większa automatyzacja i zależność od danych w czasie rzeczywistym, tym większe ryzyko efektu kaskadowego, w którym naruszenie jednego komponentu wpływa na kolejne elementy infrastruktury. Z perspektywy bezpieczeństwa oznacza to konieczność traktowania Rolnictwa 4.0 nie tylko jako źródła wzrostu produktywności, ale także jako środowiska wymagającego kompleksowego zarządzania ryzykiem cybernetycznym, obejmującego zarówno technologie, jak i procedury organizacyjne oraz szkolenie użytkowników.

Cyberataki w rolnictwie

Infrastruktura cyfrowa w rolnictwie często charakteryzuje się niższym poziomem zabezpieczeń niż w innych sektorach. Wynika to z ograniczonych zasobów finansowych, niskiej świadomości zagrożeń oraz stosowania przestarzałych technologii. Dodatkowo rozproszony charakter gospodarstw rolnych utrudnia wdrażanie jednolitych systemów bezpieczeństwa. Urządzenia IoT oraz mobilne systemy sterowania zwiększają powierzchnię potencjalnego ataku. Skutki cyberataków w rolnictwie mogą prowadzić do:

- strat finansowych,
- utraty danych,
- zakłóceń w łańcuchu dostaw,
- spadku zaufania konsumentów,
- zagrożeń dla bezpieczeństwa żywnościowego.

Według raportów FAO¹¹, destabilizacja cyfrowych systemów produkcji żywności może mieć konsekwencje na poziomie krajowym i globalnym. W rolnictwie cyfrowym

⁹ „<https://www.firstdistribution.com/wp-content/uploads/2023/01/rpt-future-tense-trend-micro-security-predictions-for-2023-1.pdf>”, b.d., dostęp 10 maja 2026, <https://www.firstdistribution.com/wp-content/uploads/2023/01/rpt-future-tense-trend-micro-security-predictions-for-2023-1.pdf>.

¹⁰ S. W. I. swissinfo.ch. „Hacker violano robot mungitura e chiedono riscatto, una mucca muore”, SWI swissinfo.ch, 6 sierpnia 2024, <https://www.swissinfo.ch/ita/hacker-violano-robot-mungitura-e-chiedono-riscatto%2c-una-mucca-muore/86216855>.

¹¹ FAO, The State of Food and Agriculture 2021. Making Agrifood Systems More Resilient to Shocks and Stresses, The State of Food and Agriculture (SOFA) 2021 (FAO, 2021), <https://doi.org/10.4060/cb4476en>.

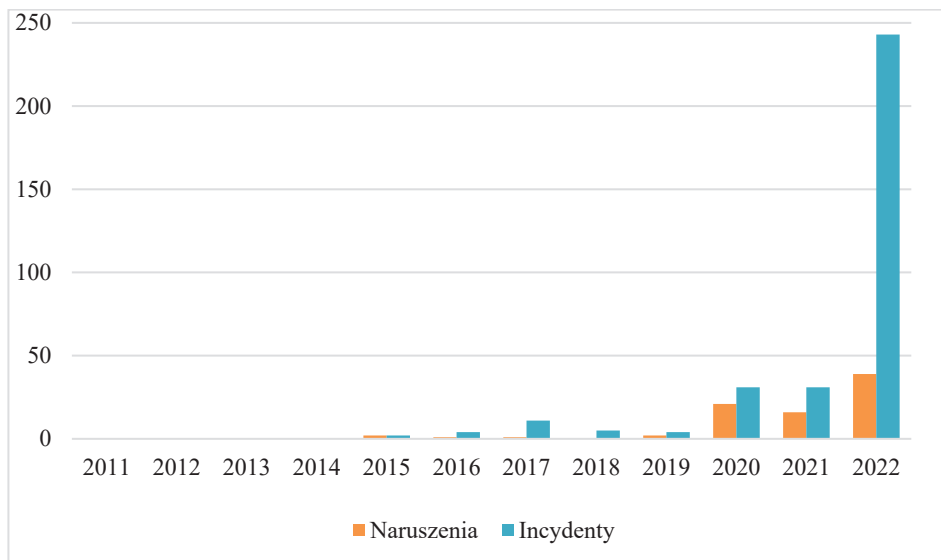
dominują specyficzne wektory ataków, które ewoluują wraz z rozwojem technologii. Poniżej wymieniono wybrane zagrożenia cybernetyczne oraz ich odniesienie do rolnictwa:

1. Ransomware i wymuszenia. Oprogramowanie wymuszające okup pozostaje najbardziej szkodliwym zagrożeniem. Przykładem jest atak na JBS S.A. w 2021 roku, który wymusił zapłatę 11 milionów dolarów okupu po zablokowaniu systemów odpowiadających za od 20% do 25% produkcji wołowiny w USA¹². W 2020 roku australijska firma Talman (przetwarzająca ok 75% wełny w Australii) straciła od 60 do 80 milionów AUD w wyniku paraliżu handlu wełną po ataku ransomware¹³.
2. Manipulacja danymi i ataki na sensory. Ataki typu False Data Injection (FDIA) polegają na przesyłaniu fałszywych odczytów z czujników. W inteligentnych szklarniach manipulacja poziomem CO₂ lub wilgotnością może doprowadzić do utraty upraw w ciągu kilku godzin. Zmiany dawki nawożenia w nowoczesnych rozsiewaczach mogą doprowadzić do znacznego obniżenia plonu a w konsekwencji do dużych strat finansowych. Zmiany wykonane w sterownikach zainstalowanych w oborach i farmach mogą skutkować zmianami dawek paszowych czy parametrów doju.
3. Zagrożenia związane z dronami (UAV). Drony wspomagające rolnictwo są podatne na GPS spoofing i jamming. Zagłuszanie sygnału GPS może prowadzić do dezorientacji maszyny, a spoofing pozwala atakującemu na przejęcie kontroli nad lotem (hijacking). Może to skutkować zniszczeniem drogiego urządzenia lub niekontrolowanym opryskiem obszarów chronionych.
4. Zaawansowane, trwałe zagrożenia (APT). Grupy APT, często sponsorowane przez państwa totalitarne, celują w kradzież własności intelektualnej, takiej jak np. dane genetyczne roślin czy algorytmy predykcyjne. Ataki te trwają długo i są trudne do wykrycia, w niektórych przypadkach mają na celu nie tylko kradzież, ale także destabilizowanie rynku. Aktualnie sektor rolniczy nie jest priorytetowym celem grup APT, jednak w na najbliższej przyszłości to zagrożenie będzie realne.
5. Zagrożenia nie spowodowane atakami. Zagrożenia w obszarze cyber obejmują nie tylko bezpośrednie ataki na infrastrukturę IT czy OT. Mogą to być awarie sprzętu, błędy w oprogramowaniu, nieprawidłowa konfiguracja programów i urządzeń a także błędy ludzkie. Mimo iż nie są przejawem świadomego działania przestępców, to jednak ich konsekwencje mogą być bardzo kosztowne.

Różnorodność zagrożeń sprawia, że trudno jest wprowadzić skuteczne zabezpieczenia, a badania wskazują, że ilość ataków w kolejnych latach systematycznie wzrasta.

¹² Sekurak, „Największy dostawca mięsa, JBS, zapłacił okup w wysokości 11 milionów dolarów...”, Sekurak, 10 czerwca 2021, <https://sekurak.pl/najwiekszy-dostawca-miesa-jbs-zaplacil-okup-w-wysokosci-11-milionow-dolarow/>.

¹³ SecureWorld News Team, „Ransomware Attack Hits Sheep Farmers? Yes, It Is True”, dostęp 10 maja 2026, <https://www.secureworld.io/industry-news/ransomware-attack-sheep-wool-market>.



Rysunek 1. Liczba incydentów bezpieczeństwa oraz naruszeń bezpieczeństwa w latach 2015-2023 w sektorze rolno-spożywczym

Źródło: opracowanie własne na podstawie¹⁴

Na rysunku 1 przedstawione zostały dane dotyczące 397 incydentów i 115 naruszeń bezpieczeństwa w ostatnich latach w sektorze rolno-spożywczym, z których 30 zostało opisane przez autorów raportu w sposób szczegółowy. Dane dotyczą przede wszystkim USA, ale obejmują też incydenty z całego świata. Raportowane straty finansowe incydentów to miliony dolarów, a straty największego raportowanego incyduentu określono na 202 mln USD.

Strategie obrony

Minimalizacja ryzyka cyberzagrożeń wymaga wdrożenia zintegrowanych środków technicznych i organizacyjnych, dostosowanych do specyfiki środowiska. Do podstawowych działań należą:

- regularne aktualizacje systemów,
- uwierzytelnianie wieloskładnikowe,
- segmentacja sieci,
- szyfrowanie danych,
- szkolenia pracowników.

Istotne jest również tworzenie kopii zapasowych oraz wdrażanie planów reagowania na incydenty.

¹⁴ Ajay Kulkarni et al., „A Review of Cybersecurity Incidents in the Food and Agriculture Sector”, arXiv.Org, 12 marca 2024, <https://arxiv.org/abs/2403.08036v1>.

O ile działania te są z powodzeniem stosowane w przedsiębiorstwach i instytucjach, to w rolnictwie będą miały swoją specyfikę¹⁵. W warunkach rolniczych środki te muszą uwzględniać rozproszony charakter infrastruktury, obejmującej urządzenia IoT, systemy sterowania maszynami, platformy chmurowe oraz mobilny dostęp do danych. Z tego względu szczególnie ważne jest odseparowanie urządzeń polowych od głównych systemów zarządzania, ograniczanie uprawnień dostępowych oraz zabezpieczanie transmisji danych między sensorami, maszynami i aplikacjami analitycznymi. Oznacza to, że strategię obrony w rolnictwie nie mogą stanowić prostego przeniesienia praktyk korporacyjnych, lecz powinny być projektowane z uwzględnieniem sezonowości prac, zmiennej dostępności personelu oraz zależności od infrastruktury terenowej.

Wysoka skuteczność strategii obrony zależy ponadto od regularnego testowania procedur odtwarzania danych, ćwiczeń reagowania na incydenty oraz okresowej oceny ryzyka. W sektorze rolniczym, gdzie nawet krótkotrwałe zakłócenie pracy może wpłynąć na nawadnianie, żywienie zwierząt lub terminowość zabiegów agrotechnicznych, przygotowanie scenariuszy awaryjnych ma znaczenie nie tylko techniczne, lecz także ekonomiczne. Z tego względu cyberbezpieczeństwo powinno być traktowane jako integralny element zarządzania gospodarstwem, a nie wyłącznie jako zagadnienie informatyczne.

Nauka i edukacja

Nowoczesne technologie wdrażane w rolnictwie muszą się opierać na badaniach naukowych oraz odpowiednio wyszkolonej kadrze. Aktualnie uczelnie wyższe są priorytetowym celem dla cyberprzestępców, a liczba ataków na nie znacznie się zwiększyła. W celu ochrony swej cyberprzestrzeni, uczelnie realizują różne działania. Takim działaniem jest projekt SOCCER - "Developing and deploying SOC capabilities for the academic sector – a teamwork of Universities and RTOs in the CEE region", który ma na celu wzmocnienie zdolności i odporności UE w zakresie cyberbezpieczeństwa sektora akademickiego¹⁶. W przypadku Uniwersytetu Rolniczego oznacza to nie tylko lepszą ochronę danych studentów, pracowników i wyników badań, ale także większą odporność laboratoriów, systemów zarządzania zajęciami, repozytoriów wiedzy oraz narzędzi wykorzystywanych w dydaktyce i badaniach.

Z perspektywy uczelni rolniczej znaczenie projektu polega na zwiększaniu ochrony infrastruktury dydaktycznej, danych badawczych oraz systemów wspierających kształcenie i współpracę naukową. Szczególną rolę odgrywa tu SOC4Academia Toolbox, który dostarcza praktycznych ram budowy odporności cybernetycznej, obejmujących zarówno aspekty techniczne, jak i organizacyjne¹⁷. W konsekwencji SOCCER należy postrzegać jako narzędzie instytucjonalnego wzmacniania bezpieczeństwa środowiska akademickiego.

¹⁵ Erin G. Robinson, „Why Cybersecurity Must Be a Top Priority for Agribusiness in 2025”, Purdue Center for Food and Agricultural Business, 20 lutego 2025, <https://agribusiness.purdue.edu/2025/02/20/why-cybersecurity-must-be-a-top-priority-for-agribusiness-in-2025/>.

¹⁶ Cupiał, M., Ponikiewcz, M., & Faber, Ł., „Cyberbezpieczeństwo w obszarze logistyki”, w *Transport i logistyka w dobie inżynierii mechanicznej*, Tom IV (Polskie Towarzystwo Inżynierii Rolniczej - Wydawnictwo Inżynieria Rolnicza., 2025).

¹⁷ Łukasz Faber et al., SOC4Academia Toolbox (SOCCER Project, 2025).

kiego, które pośrednio wspiera również rozwój nowoczesnej edukacji rolniczej opartej na technologiach cyfrowych.

Podsumowanie

Cyberbezpieczeństwo w rolnictwie stanowi istotne wyzwanie w dobie cyfryzacji tego sektora. Rosnąca liczba zagrożeń wymaga kompleksowego podejścia, obejmującego technologie, edukację oraz regulacje. Tylko skoordynowane działania pozwolą zapewnić stabilność produkcji żywności i bezpieczeństwo infrastruktury rolniczej. Cyberbezpieczeństwo w rolnictwie przestaje być problemem technicznym, a staje się podstawą zachowania bezpieczeństwa żywnościowego. Skuteczna ochrona inteligentnego gospodarstwa wymaga podejścia wielowarstwowego: od wzmacniania bezpieczeństwa fizycznego sensorów, przez szyfrowanie komunikacji, po profesjonalne zarządzania ryzykiem zgodnie z wymogami NIS2¹⁸ i odpowiednich ustaw¹⁹. Rolnictwo 4.0 pozwoli na wyżywienia naszej planety, ale tylko pod warunkiem zbudowania odporności na zagrożenia cyfrowe, które są dziś równie realne jak szkodniki czy susze. Stąd też podejmowanie działań związanych z bezpieczeństwem cybernetycznym, jest obecnie niezbędnym składnikiem wdrażania nowych technologii w sektorze rolno-spożywczym.

Opracowanie wykonano w ramach projektu SOCCER finansowanego przez European Cybersecurity Competence Centre oraz Polskie Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego w ramach programu „Projekty Międzynarodowe Współfinansowane”.

Bibliografia

- Bui, Hang Thanh, Hamed Aboutorab, Arash Mahboubi, et al. „Agriculture 4.0 and beyond: Evaluating cyber threat intelligence sources and techniques in smart farming ecosystems”. *Computers & Security* 140 (maja 2024): 103754. <https://doi.org/10.1016/j.cose.2024.103754>.
- Campoverde-Molina, Milton, i Sergio Luján-Mora. „Cybersecurity in smart agriculture: A systematic literature review”. *Computers & Security* 150 (marca 2025): 104284. <https://doi.org/10.1016/j.cose.2024.104284>.
- Cupiał, M., Ponikiewicz, M., & Faber, Ł. „Cyberbezpieczeństwo w obszarze logistyki”. W *Transport i logistyka w dobie inżynierii mechanicznej*, Tom IV. Polskie Towarzystwo Inżynierii Rolniczej - Wydawnictwo Inżynieria Rolnicza., 2025.
- European Union Agency for Cybersecurity. ENISA Threat Landscape 2022: July 2021 to July 2022. Publications Office, 2022. <https://doi.org/10.2824/764318>.
- Faber, Łukasz, Paweł Kopeć, Michał Kutra, et al. SOC4Academia Toolbox. SOCCER Project, 2025.
- FAO. The State of Food and Agriculture 2021. Making Agrifood Systems More Resilient to Shocks and Stresses. The State of Food and Agriculture (SOFA) 2021. FAO, 2021. <https://doi.org/10.4060/cb4476en>.

¹⁸ „NIS2 Directive: Securing Network and Information Systems | Shaping Europe’s Digital Future”, dostęp 3 lutego 2026, <https://digital-strategy.ec.europa.eu/en/policies/nis2-directive>.

¹⁹ *Ustawa z dnia 23 stycznia 2026 r. o zmianie ustawy o krajowym systemie cyberbezpieczeństwa oraz niektórych innych ustaw*, b.d.

- „<https://www.firstdistribution.com/wp-content/uploads/2023/01/rpt-future-tense-trend-micro-security-predictions-for-2023-1.pdf>”. b.d. Dostęp 10 maja 2026. <https://www.firstdistribution.com/wp-content/uploads/2023/01/rpt-future-tense-trend-micro-security-predictions-for-2023-1.pdf>.
- Kampouraki, Ioanna. Foresight Cybersecurity Threats for 2030 – Update. 2030.
- Kristen, Erwin, Reinhard Kloibhofer, Vicente Hernández Díaz, i Pedro Castillo. „Security Assessment of Agriculture IoT (AIoT) Applications”. *Applied Sciences* 11, nr 13 (2021): 5841. <https://doi.org/10.3390/app11135841>.
- Kulkarni, Ajay, Yingjie Wang, Munisamy Gopinath, Dan Sobien, Abdul Rahman, i Feras A. Batareseh. „A Review of Cybersecurity Incidents in the Food and Agriculture Sector”. *arXiv.Org*, 12 marca 2024. <https://arxiv.org/abs/2403.08036v1>.
- „NIS2 Directive: Securing Network and Information Systems | Shaping Europe’s Digital Future”. Dostęp 3 lutego 2026. <https://digital-strategy.ec.europa.eu/en/policies/nis2-directive>.
- Robinson, Erin G. „Why Cybersecurity Must Be a Top Priority for Agribusiness in 2025”. *Purdue Center for Food and Agricultural Business*, 20 lutego 2025. <https://agribusiness.purdue.edu/2025/02/20/why-cybersecurity-must-be-a-top-priority-for-agribusiness-in-2025/>.
- rohann@checkpoint.com. „Global Cyber Threats August 2025: Agriculture in the Crosshairs”. *Check Point Blog*, 11 września 2025. <https://blog.checkpoint.com/research/global-cyber-threats-august-2025-agriculture-hit-hard/>.
- sekurak. „Największy dostawca mięsa, JBS, zapłacił okup w wysokości 11 milionów dolarów...”. *Sekurak*, 10 czerwca 2021. <https://sekurak.pl/najwiekszy-dostawca-miesa-jbs-zaplacil-okup-w-wysokosci-11-milionow-dolarow/>.
- swissinfo.ch, S. W. I. „Hacker violano robot mungitura e chiedono riscatto, una mucca muore”. *SWI swissinfo.ch*, 6 sierpnia 2024. <https://www.swissinfo.ch/ita/hacker-violano-robot-mungitura-e-chiedono-riscatto%2c-una-mucca-muore/86216855>.
- Team, SecureWorld News. „Ransomware Attack Hits Sheep Farmers? Yes, It Is True”. Dostęp 10 maja 2026. <https://www.secureworld.io/industry-news/ransomware-attack-sheep-wool-market>.
- Ustawa z dnia 23 stycznia 2026 r. o zmianie ustawy o krajowym systemie cyberbezpieczeństwa oraz niektórych innych ustaw. b.d.
- Wolfert, Sjaak, Lan Ge, Cor Verdouw, i Marc-Jeroen Bogaardt. „Big Data in Smart Farming – A review”. *Agricultural Systems* 153 (maja 2017): 69–80. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2017.01.023>.

Adres do korespondencji: michal.cupial@urk.edu.pl

ORCID: Michał Cupiał 0000-0002-1984-6861

ORCID: Bogdan Kulig 0000-0002-5152-5064

BIG DATA W PRZEMYSŁE, ROLNICTWIE I INNYCH SEKTORACH GOSPODARKI

Paweł Delimata¹, Piotr Grochowalski^{2,3}, Wojciech Koziol^{2,3}, Paweł Bałuka⁴

¹ Liceum Ogólnokształcące z Oddziałami Dwujęzycznymi w Boguchwale

² Instytut Informatyki, Wydział Nauk Ścisłych i Technicznych, Uniwersytet Rzeszowski w Rzeszowie

³ Instytut Nauk Technicznych, Wydział Nauk Technicznych i Sztuk Projektowych, Państwowa Akademia Nauk Stosowanych w Przemyśle

⁴ Dypłomant w Instytucie Nauk Technicznych, Wydział Nauk Technicznych i Sztuk Projektowych, Państwowa Akademia Nauk Stosowanych w Przemyśle

Wprowadzenie

Ewolucja technologii przetwarzania i analizy wielkich zbiorów danych fundamentalnie przekształciła sposób funkcjonowania współczesnych sektorów gospodarki. Jeszcze niedawno pojęcie Big Data funkcjonowało wyłącznie w gronie specjalistów od baz danych i nielicznych analityków. Dziś trudno wskazać branżę, która mogłaby pozwolić sobie na niedocenień potencjału drzemiącego w dużych zbiorach danych. Od hal produkcyjnych koncernów motoryzacyjnych, przez precyzyjnie monitorowane uprawy, aż po szpitalne systemy wczesnego ostrzegania dane stały się walutą, a umiejętność ich wykorzystywania często decyduje o przewadze konkurencyjnej.

Miniaturyzacja sensorów i spadek kosztów elektroniki w ostatnich latach przyspieszyły adaptację zaawansowanych czujników o klasie dokładności wcześniej zarezerwowanej dla laboratoriów. Urządzenia takie jak akcelerometry, czujniki wibracji, kamery termowizyjne, spektrometry bliskiej podczerwieni potrafią w krótkim czasie wygenerować ogromną liczbę danych. Agregacja tych sygnałów tworzy jeziora danych, których przetwarzanie wymaga architektur rozproszonych opartych na frameworkach takich jak Apache Hadoop, Spark czy Flink¹.

Transformacja cyfrowa niesie ze sobą nie tylko możliwości optymalizacyjne, ale również poważne wyzwania natury etycznej, prawnej i społecznej. Gromadzenie danych w skali globalnej rodzi pytania o prywatność, suwerenność informacyjną i potencjalne nadużycia ze strony korporacji czy aparatów państwowych². Algorytmy podejmujące decyzje o kredytach, zatrudnieniu czy warunkowym zwolnieniu z aresztu działają w oparciu o modele, których wewnętrzna logika bywa nieprzenikniona nawet dla ich twórców. Jest to zjawisko określane mianem „czarnej skrzynki” (ang. *Black Box AI*).

¹ Marz, N., Warren, J., Big Data: Principles and Best Practices of Scalable Realtime Data Systems. Manning Publications, 2015.

² O'Neil, C., Weapons of Math Destruction: How Big Data Increases Inequality and Threatens Democracy. Crown Books, 2016.

Niniejsze opracowanie stanowi analizę implementacji technologii Big Data w wybranych, sektorach gospodarki: przemyśle ciężkim (Przemysł 4.0), rolnictwie precyzyjnym (Rolnictwo 4.0), ochronie zdrowia oraz infrastrukturze miejskiej (ang. *Smart Cities*).

Teoretyczne fundamenty Big Data i Przemysłu 4.0 **Big Data: od modelu 3V do analityki strumieniowej**

Pojęcie Big Data wykracza daleko poza proste określenie „dużych zbiorów danych”. W początkowej fazie formalizacji Doug Laney, analityk firmy Meta Group (później przejętej przez Gartnera), zaproponował w 2001 roku model opisujący trzy fundamentalne wymiary problemu: Volume (wolumen), Velocity (prędkość) i Variety (różnorodność)³. Ten schemat okazał się trafnym narzędziem pojęciowym i uchwycił istotę transformacji, w której tradycyjne relacyjne bazy danych przestały nadążać za napływem informacji generowanych przez miliardy podłączonych urządzeń.

Wolumen odnosi się do skali danych, mierzonej obecnie w petabajtach i eksabajtach. Prędkość opisuje tempo generowania i przetwarzania danych – od raportów tworzonych w cyklach dobowych, przez strumienie zdarzeń w czasie rzeczywistym, po mikrosekundowe transakcje giełdowe.

W miarę rosnącej złożoności systemów model 3V uznano za niewystarczający. Wprowadzono kolejne wymiary: Veracity (wiarygodność), odnoszącą się do jakości, kompletności i pewności danych, oraz Value (wartość), podkreślającą, że samo gromadzenie informacji jest bezwartościowe bez mechanizmów ekstrakcji użytecznej wiedzy. Niektórzy badacze proponują modele rozszerzone 7V, a nawet 14V uwzględniające Variability (zmienność wzorców danych), Validity (poprawność w kontekście zamierzonego zastosowania) czy Visualization (zdolność prezentacji wyników w zrozumiałej formie graficznej)⁴. Ewolucję modeli charakteryzujących Big Data przedstawia tabela 1.

Przejsie od klasycznych hurtowni danych do rozproszonych platform analitycznych oznaczało rewolucję w sposobie myślenia o przetwarzaniu informacji. Marz i Warren⁵ zaproponowali architekturę Lambda, łączącą warstwę przetwarzania wsadowego (ang. *batch layer*) z warstwą czasu rzeczywistego (ang. *speed layer*). To podejście pozwala na jednoczesne przetwarzanie setek nakładających się strumieni danych z zachowaniem gwarancji spójności czyli czegoś, co jeszcze niedawno wydawało się domeną futurystycznych wizji. Współcześnie alternatywą jest architektura Kappa, eliminująca warstwę wsadową na rzecz ujednoliconego przetwarzania strumieniowego w narzędziach takich jak Apache Kafka Streams czy Apache Flink.

³ Gandomi, A., Haider, M., Beyond the hype: Big data concepts, methods, and analytics. *International Journal of Information Management*, 35(2), 137–144, 2015.

⁴ Gandomi, A., Haider, M., 2015, *ibidem*.

⁵ Marz, N., Warren, J., 2015, *ibidem*.

Tabela 1. Ewolucja modeli charakteryzujących Big Data

Model	Liczba wymiarów	Kluczowe wymiary	Rok propozycji
3V (Laney)	3	Volume, Velocity, Variety	2001
4V	4	+ Veracity	~2012
5V	5	+ Value	~2013
7V	7	+ Variability, Visualization	~2014
14V (rozszerzony)	14	+ Validity, Venue, Vocabulary i in.	~2017

Źródło: opracowanie własne na podstawie⁶

Architektura Cyber-Physical Systems w kontekście Przemysłu 4.0

Czwarta rewolucja przemysłowa (Przemysł 4.0) wyróżnia się na tle trzech poprzednich rewolucji (mechanizacji, elektryfikacji, automatyzacji) przede wszystkim głębokością integracji świata fizycznego z cyberprzestrzenią. O ile trzecia rewolucja wprowadziła sterowniki PLC i roboty przemysłowe, o tyle czwarta tworzy samoświadome systemy zdolne do autonomicznej adaptacji na podstawie analizy danych w czasie rzeczywistym. Kluczową koncepcją umożliwiającą tę transformację są Systemy Cyber – Fizyczne (ang. *Cyber-Physical Systems*, *CPS*) czyli głęboko zintegrowane architektury łączące komponenty obliczeniowe, sieciowe i fizyczne w sprzężone pętle sterowania⁷.

Lee, Bagheri i Kao⁸ w swojej pracy zaproponowali pięciowarstwową architekturę CPS, tzw. model 5C stanowiący systematyczny przewodnik implementacyjny dla nowoczesnych systemów produkcyjnych. Architektura ta organizuje przepływ informacji od surowych danych sensorycznych do autonomicznych decyzji konfiguracyjnych, tworząc zamkniętą pętlę sprzężenia zwrotnego między światem fizycznym a cyfrowym. Strukturę architektury przedstawiono w tabeli 2.

Pierwsza warstwa - inteligentnego połączenia (ang. *Smart Connection*) odpowiada za zbieranie danych z czujników fizycznych, zapewniając transfer sygnałów z maszyn i komponentów. Druga warstwa - przetwarzania danych w informacje (ang. *Data to Information Conversion*) przetwarza surowe dane w informacje o stanie maszyn, kalkulując wskaźniki zużycia i szacując pozostały czas użytkowania (ang. *Remaining Useful Life*, *RUL*). Na trzecim poziomie warstwy cybernetycznej (ang. *Cyber*) dane z wielu maszyn agregowane są w centralnym „jeziorze danych”, tworząc zintegrowany obraz całego systemu produkcyjnego. Tutaj stosowane są algorytmy analityczne umożliwiające porównania typu peer-to-peer i analizę historycznych wzorców. Warstwa poznawcza (ang. *Cognition*) syntetyzuje wiedzę z warstwy Cyber, prezentując ją ekspertom w formie inteligentnych wizualizacji i infografik wspierających procesy decyzyjne. Ostatnia warstwa konfiguracji (ang. *Configuration*) zamyka pętlę, przekładając wyniki analiz na konkretne działania korekcyjne i prewencyjne w fizycznym świecie produkcji.

⁶ Gandomi, A., Haider, M., 2015, ibidem.

⁷ Boyes, H., Hallaq, B., Cunningham, J., Watson, T., The industrial internet of things (IIoT): An analysis framework. *Computers in Industry*, 101, 1–12, 2018.

⁸ Lee, J., Bagheri, B., Kao, H. A., A cyber-physical systems architecture for industry 4.0-based manufacturing systems. *Manufacturing Letters*, 3, 18–23, 2015.

Tabela 2. Architektura 5C dla Systemów Cyber-Fizycznych

Warstwa	Nazwa	Funkcja	Przykład zastosowania
I	Smart Connection	Akwizycja danych sensorycznych	Czujniki wibracji, temperatury, ciśnienia
II	Data-to-Information	Konwersja danych w informacje	Kalkulacja wskaźników RUL, degradacji
III	Cyber	Agregacja i analityka sieciowa	Cyfrowy Bliźniak, porównania peer-to-peer
IV	Cognition	Synteza wiedzy i wizualizacja	Dashboardy decyzyjne, infografiki
V	Configuration	Autonomiczne sterowanie zwrotne	Samooptymalizacja parametrów maszyn

Źródło: opracowanie własne na podstawie Lee, Bagheri i Kao⁹

Algorytmy predykcyjne i uczenie głębokie

Przemysłowe systemy klasy ERP i MES bazowały na statycznych tablicach danych operacyjnych – tabelach planistycznych, harmonogramach produkcji, zestawieniach magazynowych. Klasyczne metody statystyczne, takie jak regresja liniowa czy proste modele szeregów czasowych ARIMA, sprawdzały się dobrze w przewidywalnym, powtarzalnym środowisku masowej produkcji XX wieku.

Współczesne linie produkcyjne generują tysiące zmiennych jednocześnie: wibracje łożysk, profile temperaturowe narzędzi skrawających, spektra akustyczne silników, obrazy z kamer inspekcyjnych. Wszystko to tworzy wielowymiarową przestrzeń danych. Klasyczne metody okazały się po prostu zbyt „płytkie” algorytmicznie, by wychwycić subtelne, wieloczynnikowe interakcje między zmiennymi, które poprzedzają awarię o dni, a czasem tygodnie. Konieczne stało się sięgnięcie po architekturę uczenia głębokiego (ang. *deep learning*).

Monografia Goodfellowa, Bengio i Courville'a¹⁰ z 2016 roku stała się encyklopedią współczesnych architektur neuronowych. Wang i in.¹¹ w obszernym przeglądzie skatalogowali główne klasy modeli stosowanych w inteligentnej produkcji: konwolucyjne sieci neuronowe (CNN) do inspekcji wizualnej, rekurencyjne sieci LSTM do prognozowania szeregów czasowych, autoenkodery do detekcji anomalii oraz sieci generatywno-adwersaryjne (GAN) do augmentacji danych treningowych.

Szczególnie imponujące wyniki uzyskano w domenie automatycznej inspekcji wizualnej. Weimer, Scholz-Reiter i Shpitalni¹² wykazali, że głębokie sieci konwolucyjne potrafią automatycznie wyodrębnić cechy defektów na powierzchniach metalowych z dokładnością przewyższającą doświadczonych inspektorów ludzkich. To osiągnięcie

⁹ Lee, J., Bagheri, B., Kao, H. A., 2015, ibidem.

¹⁰ Goodfellow, I., Bengio, Y., Courville, A., Deep Learning. MIT Press, 2016.

¹¹ Wang, J., Ma, Y., Zhang, L., Gao, R. X., Wu, D., Deep learning for smart manufacturing: Methods and applications. Journal of Manufacturing Systems, 48, 144–156, 2018.

¹² Weimer, D., Scholz-Reiter, B., Shpitalni, M., Design of deep convolutional neural network architectures for automated feature extraction in industrial inspection. CIRP Annals, 65(1), 417–420, 2016.

oznacza nie tylko wzrost jakości kontroli, ale też eliminację wąskiego gardła manualnej inspekcji, tradycyjnie stanowiącej jeden z najwolniejszych etapów procesu produkcyjnego.

Zastosowanie Big Data w produkcji i przemyśle ciężkim Utrzymanie predykcyjne – modelowanie RUL

Utrzymanie predykcyjne (ang. *Predictive Maintenance, PdM*) stanowi prawdopodobnie najważniejszy, a zarazem najbardziej mierzalny obszar zwrotu z inwestycji w technologii Big Data w przemyśle. Mobley¹³ wyodrębnił trzy paradygmaty utrzymania ruchu, które następowały po sobie historycznie: reaktywny (ang. *run-to-failure*), prewencyjny (ang. *time-based*) i predykcyjny (ang. *condition-based*).

W modelu reaktywnym maszyna pracowała do momentu katastrofalnej awarii. Koszty były ogromne nie tylko ze względu na wymianę zniszczonego komponentu, ale przede wszystkim z powodu nieplanowanego przestoju całej linii produkcyjnej, co w zakładach pracujących w trybie ciągłym generowało ogromne straty. Model prewencyjny wprowadził harmonogramy przeglądów opartych na zaleceniach producenta, ale miał wadę: wymiana komponentów następowała według kalendarza, nie według faktycznego stanu zużycia. Prowadziło to do dwóch równie kosztownych scenariuszy czyli przedwczesnej wymiany w pełni sprawnych części lub zbyt późnej interwencji, gdy degradacja postąpiła dalej niż zakładały normy.

Wprowadzenie wielkoskalowej analityki Big Data i algorytmów uczenia maszynowego radykalnie zmieniło to podejście. Zamiast pytać „kiedy minął termin przeglądu?”, systemy predykcyjne pytają „jaki jest aktualny stan techniczny maszyny i ile czasu pozostało do przekroczenia progu bezpieczeństwa?”. Lei i in.¹⁴ przeprowadzili przegląd obejmujący cały łańcuch przetwarzania danych w prognosyce maszynowej. Droga od zbierania sygnałów, przez ekstrakcję cech, po predykcję pozostałego czasu użytkowania (RUL). Ich analiza pokazała, że sieci LSTM (ang. Long Short-Term Memory) są szczególnie skuteczne w modelowaniu degradacji dzięki zdolności uczenia się długoterminowych zależności w sekwencjach czasowych. Porównanie paradygmatów utrzymania ruchu przedstawiono w tabeli 3.

Badania empiryczne potwierdzają, że modele oparte na sieciach LSTM mogą osiągać dokładność predykcji przekraczającą 96% a szczególnie w konfiguracji hybrydowej CNN-LSTM, gdzie warstwa konwolucyjna odpowiada za ekstrakcję cech z surowych sygnałów, a warstwa rekurencyjna modeluje dynamikę czasową. W jednym z badań nad prognozowaniem awarii transformatorów, model hybrydowy CNN-LSTM osiągnął dokładność 96,1% i F1-score 95,2%. Inny eksperyment dotyczący predykcji uszkodzeń silników lotniczych wykazał precyzję na poziomie 97% przy stuprocentowym recall.

¹³ Mobley, R. K., *An Introduction to Predictive Maintenance* (2nd ed.). Butterworth-Heinemann, 2002.

¹⁴ Lei, Y., Li, N., Guo, L., Li, N., Yan, T., Lin, J., *Machinery health prognostics: A systematic review from data acquisition to RUL prediction*. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 104, 799–834, 2017.

Tabela 3. Porównanie paradygmatów utrzymania ruchu

Parametr	Model reaktywny	Model prewencyjny	Model predykcyjny (PdM)
Podstawa decyzji	Awaria	Harmonogram czasowy	Bieżący stan maszyny (dane sensoryczne)
Koszt przestoju	Bardzo wysoki	Średni	Niski (planowane mikroprzestoje)
Wykorzystanie komponentów	Maksymalne (do zniszczenia)	Suboptymalne (przedwczesna wymiana)	Optymalne (wymiana blisko progu)
Wymagana infrastruktura	Brak	Dokumentacja serwisowa	Sensory + platforma Big Data + ML
Typowa redukcja kosztów	—	10–20% vs. reaktywny	25–40% vs. prewencyjny

Źródło: opracowanie własne na podstawie Mobley, R. K.¹⁵

Wu i in.¹⁶ w badaniu porównawczym zestawili wydajność algorytmów lasów losowych (ang. *Random Forests*), sieci neuronowych i maszyn wektorów nośnych (SVM) w zadaniu predykcji zużycia narzędzi skrawających na podstawie danych z testów frezowania. *Random Forests* wykazały najlepszą kombinację dokładności i interpretowalności, co czyni je atrakcyjną alternatywą dla głębokich sieci neuronowych tam, gdzie kluczowa jest transparentność modelu i zrozumienie czynników wpływających na degradację.

Jednym z kluczowych zastosowań danych gromadzonych w ramach utrzymania predykcyjnego są Cyfrowe Bliźniaki (ang. *Digital Twin*), które umożliwiają odwzorowanie i analizę rzeczywistych obiektów oraz procesów w środowisku cyfrowym.

Cyfrowe Bliźniaki jako środowisko symulacji

Koncepcja wirtualnego prototypowania nie jest nowa – branże lotnicza i architektoniczna stosują symulacje komputerowe od dawna. Koncepcja Cyfrowego Bliźniaka sformalizowana przez Grievesa¹⁷ w 2014 roku, wprowadziła nowy wymiar: ciągłą, dwukierunkową synchronizację między obiektem fizycznym a jego wierną wirtualną kopią.

Tao i in.¹⁸ w systematycznym porównaniu Cyfrowych Bliźniaków i Systemów Cyber-Fizycznych, precyzyjnie rozgraniczyli te dwa pojęcia, wskazując jednocześnie na ich współdziałanie w kontekście Przemysłu 4.0. Cyfrowy Bliźniak stanowi wirtualną

¹⁵ Mobley, R. K., 2002, ibidem.

¹⁶ Wu, D., Jennings, C., Terpenney, J., Gao, R. X., Kumara, S., A comparative study on machine learning algorithms for smart manufacturing: Tool wear prediction using random forests. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 139(7), 2017.

¹⁷ Grieves, M., *Digital Twin: Manufacturing Excellence through Virtual Factory Replication*. White paper, 1(2014), 1–7, 2014.

¹⁸ Tao, F., Qi, Q., Wang, L., Nee, A. Y., Digital twins and cyber-physical systems toward smart manufacturing and industry 4.0: Correlation and comparison. *Engineering*, 5(4), 653–661, 2019.

kopię konkretnego obiektu np.: maszyny, turbiny, całej linii montażowej, a CPS definiuje systemową architekturę integracji wielu takich par fizyczno-cyfrowych.

Mechanizm działania można wyjaśnić na przykładzie turbiny wiatrowej. Kiedy fizyczny wiatrak na pełnym morzu poddawany jest ekstremalnym obciążeniom np.: porywistemu wiatrowi, korozji słonej wody, zmęczeniu materiałowemu łopat – jego Cyfrowy Bliźniak w centrum danych na lądzie odbiera strumień danych telemetrycznych i odwzorowuje stan każdego komponentu. Inżynier może na cyfrowym modelu przeprowadzić setki symulacji scenariuszowych (co jeśli wiatr wzrośnie, co jeśli temperatura łożyska przekroczy próg krytyczny?) bez jakiegokolwiek ingerencji w fizyczną maszynę. Errandonea, Beltrán i Arrizabalaga¹⁹ potwierdzili, że integracja Cyfrowych Bliźniaków z platformami Big Data znacząco poprawia skuteczność strategii utrzymania ruchu, czyniąc z nich naturalne uzupełnienie systemów predykcyjnych opisanych w poprzednim rozdziale.

Rolnictwo 4.0 – cyfrowa transformacja agrobiznesu **Zbieranie i analityka danych w Smart Farming**

Zrozumienie rewolucji cyfrowej w rolnictwie wymaga zmiany postrzegania Big Data jako domeny wyłącznie technologicznej czy finansowej. Zambon i in.²⁰ pokazali, że czwarta rewolucja przemysłowa dotyczy w równym stopniu małych i średnich przedsiębiorstw sektora rolnego, jak i wielkich korporacji przemysłowych. Terminy „Rolnictwo 4.0” i „Smart Farming” przestały być abstrakcyjnymi hasłami, a stały się opisem realnie wdrażanych systemów.

Podejście klasyczne do uprawy roślin opierało się na pokoleniowym doświadczeniu rolnika, nierzadko na intuicji i uśrednionych zaleceniach agronomicznych. Cała działka traktowana była jako jednorodna jednostka. Stosowano te same dawki nawozu, te same środki ochrony roślin, ten sam sposób nawodnienia. Dzisiejsze rolnictwo precyzyjne operuje na zupełnie innym poziomie. Czujniki glebowe rozmieszczone co kilka metrów mierzą pH, wilgotność, przewodność elektryczną oraz zawartość azotu, fosforu i potasu. Narzędzia tego typu tworzą wielowymiarową mapę pola aktualizowaną w czasie zbliżonym do rzeczywistego.

Do sieci czujników doglebowych dołączane są dane strumieniowe ze środowisk teledetekcyjnych. Satelity Sentinel 2 programu Copernicus dostarczają wielospektralne obrazy upraw w regularnych odstępach, umożliwiając obliczanie wskaźników wegetacyjnych takich jak NDVI (ang. *Normalized Difference Vegetation Index*). Drony wyposażone w kamery multispektralne i hyperspektralne uzupełniają te dane o zdjęcia o znacznie wyższej rozdzielczości przestrzennej, identyfikując lokalne strefy stresu hydrologicznego czy chorobowego na poziomie pojedynczych roślin.

¹⁹ Errandonea, I., Beltrán, S., Arrizabalaga, S., Digital Twin for maintenance: A literature review. *Computers in Industry*, 123, 103316, 2020.

²⁰ Zambon, I., Cecchini, M., Egidi, G., Saporito, M. G., Colantoni, A., Revolution 4.0: Industry vs. Agriculture in a Future Development for SMEs. *Processes*, 7(1), 36, 2019.

Wolfert i in.²¹ zidentyfikowali kluczowe źródła danych w Smart Farming oraz architektury ich integracji. Kamilaris, Kartakoullis i Prenafeta-Boldú²² uzupełnili ten obraz o analizę praktycznych wdrożeń analityki Big Data w rolnictwie, wskazując zarówno na spektakularne sukcesy, jak i na bariery adopcji np.: ograniczoną łączność internetową na obszarach wiejskich, brak standaryzacji formatów danych i trudności w integracji systemów od różnych dostawców.

Optimalizacja plonów i zrównoważone zarządzanie zasobami

Mechanizmy analityczne opisane w poprzednich rozdziałach znajdują bezpośrednie odzwierciedlenie w wynikach ekonomicznych i środowiskowych osiągniętych w ramach rolnictwa precyzyjnego. Wykorzystując uczenie maszynowe analizujące profile wegetacyjne i glebowe z lat ubiegłych, skorelowane ze zmienną mapą plonów z kombajnów wyposażonych w GPS, algorytmy predykcyjne generują mapy dostarczania nawozów o zmiennej dawce (ang. *Variable Rate Technology*, *VRT*). Zamiast rozprowadzać jednolitą ilość nawozu na całej działce, ciągnik sterowany przez mapy VRT aplikuje różne dawki w zależności od lokalnych potrzeb gleby.

Publikacje konsekwentnie potwierdzają, że wdrożenie Big Data w rolnictwie precyzyjnym prowadzi do obniżenia zużycia chemicznych środków ochrony roślin o 20–40%, a w niektórych zastosowaniach nawet więcej. Badania nad precyzyjnymi opryskiwaczami sterowanymi czujnikami w czasie rzeczywistym wykazały redukcje sięgające 30–85% w zależności od typu pestycydu i charakterystyki uprawy. Wpływ technologii rolnictwa precyzyjnego na zużycie zasobów przedstawia tabela 4. Mniejsze zużycie chemikaliów oznacza nie tylko oszczędności finansowe dla rolnika, ale przede wszystkim zmniejszone obciążenie ekosystemu oraz niższą akumulację pestycydów w glebie i wodach gruntowych. Powoduje to mniejszą presję na populacje owadów zapylających i ogólną poprawę bioróżnorodności terenów rolniczych.

Tabela 4. Wpływ technologii rolnictwa precyzyjnego na zużycie zasobów

Technologia	Parametr	Typowa redukcja /poprawa	Źródło danych
VRT (nawozy)	Zużycie nawozów	15–30% redukcja	Mapy plonów + czujniki glebowe
Precyzyjne opryskiwanie	Zużycie pestycydów	20–40% (do 85%)	Czujniki real-time + drony
Nawodnienie precyzyjne	Zużycie wody	20–50% redukcja	Czujniki wilgotności + prognoza pogody
GPS-guided seeding	Gęstość siewu	Optimalizacja $\pm 10\%$	Mapy glebowe + dane historyczne

Źródło: opracowanie własne na podstawie Kamilaris, Kartakoullis i Prenafeta-Boldú²³

²¹ Wolfert, S., Ge, L., Verdouw, C., Bogaardt, M. J., Big data in smart farming – a review. *Agricultural Systems*, 153, 69–80, 2017.

²² Kamilaris, A., Kartakoullis, A., Prenafeta-Boldú, F. X., A review on the practice of big data analysis in agriculture. *Computers and Electronics in Agriculture*, 143, 23–37, 2017.

²³ Kamilaris, A., Kartakoullis, A., Prenafeta-Boldú, F. X., 2017, ibidem.

Precyzyjne monitorowanie dobrostanu zwierząt

Cyfrowa transformacja dotyczy również hodowli zwierząt, formując dyscyplinę określaną jako Precision Livestock Farming (PLF). Berckmans²⁴ w artykule przedstawił wizję hodowli, w której każde zwierzę w wielotysięcznym stadzie jest indywidualnie monitorowane za pomocą różnych sensorów np.: akcelerometrów na obrozach rejestrujących aktywność lokomotoryczną, bolusy żwaczowe mierzące pH treści pokarmowej i temperaturę wewnętrzną, kamery 3D analizujące kondycję ciała metodami computer vision.

Algorytmy Big Data zbierają szczegółowe informacje behawioralne o każdym zwierzęciu. Wzorce ruminacji – częstotliwość, czas trwania, regularność przeżuwania. Stanowią one niezwykle czuły biomarker stanu zdrowia bydła. Analiza predykcyjna tych danych potrafi wykryć wczesne stadia chorób takich jak mastitis (zapalenie wymienia) czy kwasica żwacza na jeden do dwóch dni przed wystąpieniem klinicznych objawów widocznych dla weterynarza. Ta przewaga czasowa jest kluczowa ponieważ wczesna interwencja oznacza niższe koszty leczenia, mniejsze zużycie antybiotyków i wyższą produktywność stada.

Ekspansja analityki: ochrona zdrowia i miasta przyszłości Medycyna predykcyjna i bioinformatyka

Medycyna od zawsze była dziedziną odznaczającą się ogromną produkcją danych. Począwszy od ręcznie prowadzonych historii chorób, przez obrazy diagnostyczne, po wyniki analiz laboratoryjnych. Raghupathi W. i Raghupathi V.²⁵ w swojej pracy oszacowali, że sektor ochrony zdrowia generuje dane w tempie kilkuset petabajtów rocznie, a tempo to rośnie wykładniczo wraz z upowszechnieniem elektronicznej dokumentacji medycznej (EHR), urządzeń noszonych (wearables) i sekwencjonowania genomowego.

Bates i in.²⁶ pokazali, jak analityka Big Data może identyfikować pacjentów wysokiego ryzyka i wysokich kosztów przed eskalacją ich stanu klinicznego. Zintegrowanie danych klinicznych z parametrami socjoekonomicznymi, behawioralnymi i środowiskowymi pozwala budować wielowymiarowe profile ryzyka, które są znacznie bogatsze niż tradycyjne modele oparte wyłącznie na danych medycznych. System taki potrafi na przykład zidentyfikować pacjenta z cukrzycą typu 2, u którego występuje podwyższone ryzyko hospitalizacji w ciągu najbliższych sześciu miesięcy, wynikające m.in. z niskiego przestrzegania zaleceń lekarskich, zamieszkiwania na obszarze tzw. „food desert” (obszarze o ograniczonym dostępie do zdrowej żywności) oraz braku ubezpieczenia zdrowotnego.

²⁴ Berckmans, D., Precision livestock farming technologies for welfare management in intensive livestock systems. *Revue scientifique et technique* (International Office of Epizootics), 33(1), 189–196, 2014.

²⁵ Raghupathi, W., Raghupathi, V., Big data analytics in healthcare: promise and potential. *Health Information Science and Systems*, 2(1), 1–10, 2014.

²⁶ Bates, D. W., Saria, S., Ohno-Machado, L., Shah, A., Escobar, G., Big data in health care: using analytics to identify and manage high-risk and high-cost patients. *Health Affairs*, 33(7), 1123–1131, 2014.

Jeszcze większym polem zastosowań jest genomika i bioinformatyka. Analiza dziesiątek petabajtów danych sekwencjonowania nowej generacji (NGS) pozwala na identyfikację wariantów genetycznych predysponujących do określonych chorób, co otwiera drogę do medycyny spersonalizowanej oraz doboru terapii na podstawie profilu genetycznego konkretnego pacjenta.

Smart Cities i optymalizacja infrastruktury miejskiej

Po transformacji zamkniętych środowisk produkcyjnych, fuzja sztucznej inteligencji i analityki danych skierowała ekspansję bezpośrednio w przestrzeń miejską. Zanella i in.²⁷ zaproponowali architekturę IoT dedykowaną środowiskom miejskim, opartą na wielowarstwowej integracji czujników, bramek komunikacyjnych i platform chmurowych. Hashem i in.²⁸ uzupełnili tę perspektywę o systematyczną analizę roli Big Data w planowaniu i zarządzaniu infrastrukturą inteligentnych miast.

Podstawowym narzędziem inżynierii miejskiej napędzanej cyfrowo są inteligentne sieci transportowe ITS (ang. *Intelligent Transport Systems*). Tysiące kamer, pętle indukcyjne w nawierzchni drogowej, czujniki radarowe i dane GPS z pojazdów tworzą strumień informacji o stanie ruchu w czasie rzeczywistym. Algorytmy adaptacyjnego sterowania sygnalizacją świetlną dostosowują cykle do aktualnego natężenia ruchu, zamiast pracować w sztywnych, predefiniowanych programach. Efektem jest redukcja zużycia paliwa o ponad 30% dzięki eliminacji niepotrzebnych zatrzymań i optymalizacji ruchu drogowego.

Rewolucja miejska nie jest możliwa bez równoległej transformacji energetycznej realizowanej pod szyldem Smart Grids (inteligentnych sieci energetycznych). Dwukierunkowe liczniki energii (ang. *smart meters*), zainstalowane w milionach gospodarstw domowych, generują dane o zużyciu energii. Algorytmy prognozowania popytu wykorzystują dane pogodowe, kalendarzowe, cenowe i behawioralne. Dzięki temu operatorzy mogą precyzyjnie bilansować podaż i popyt, minimalizować straty przesyłowe, a także integrować niestabilne źródła odnawialne (fotowoltaikę, turbiny wiatrowe) z siecią w sposób, który był wcześniej nieosiągalny.

Spoleczne i socjologiczne konsekwencje datyfikacji Asymetria władzy informacyjnej i kapitalizm inwigilacyjny

W dyskusjach o systemach Big Data trzeba uwzględnić również wymiar społeczny i etyczny. Shoshana Zuboff²⁹ wprowadza pojęcie kapitalizmu inwigilacyjnego (ang. *surveillance capitalism*), definiując go jako nowy model akumulacji, w którym suro-

²⁷ Zanella, A., Bui, N., Castellani, A., Vangelista, L., Zorzi, M., Internet of things for smart cities. *IEEE Internet of Things Journal*, 1(1), 22–32, 2014.

²⁸ Hashem, I. A. T., Chang, V., Anuar, N. B., Adewole, K., Yaqoob, I., Gani, A., Chiroma, H., The role of big data in smart city. *International Journal of Information Management*, 36(5), 748–758, 2016.

²⁹ Zuboff, S., Big other: Surveillance capitalism and the prospects of an information civilization. *Journal of Information Technology*, 30(1), 75–89, 2015.

wym materiałem eksploatacji nie jest już praca ludzka ani zasoby naturalne, lecz zachowanie użytkowników przekształcane w dane predykcyjne.

Główna teza tej analizy jest niepokojąca: tak jak przez stulecia kolejne modele gospodarki wykorzystywały ziemię, pracę czy kapitał jako podstawowy surowiec produkcji, tak współczesny cyfrowy kapitalizm eksploatuje ludzkie zachowanie. Każde kliknięcie, przewinięcie strony, chwila wahania przed zakupem. Wszystko to jest rejestrowane, agregowane i przetwarzane przez wyrafinowane modele maszynowe zdolne prognozować (a niekiedy kształtować) przyszłe zachowania konsumenckie.

Couldry i Mejias³⁰ poszli o krok dalej, proponując termin „kolonializm danych” (ang. *data colonialism*) analogię do historycznego kolonializmu, w której zamiast fizycznych zasobów podbitych terytoriów eksploatowane są dane generowane przez populację globalną. Eubanks³¹ z kolei udokumentowała konkretne przypadki, w których algorytmiczne systemy decyzyjne – od alokacji zasilków po priorytetyzację interwencji służb socjalnych – systematycznie dyskryminowały najbardziej niekorzystne warstwy społeczeństwa amerykańskiego, nie z powodu złej woli ich twórców, lecz ze względu na uprzedzenia wbudowane w dane treningowe.

Przyszłość rynku pracy i bezrobocie technologiczne

W tym samym układzie zjawisk narasta jedno z największych wyzwań ekonomicznych naszych czasów czyli radykalna restrukturyzacja rynku pracy pod wpływem automatyzacji. Frey i Osborne³² w swojej analizie oszacowali, że około 47% stanowisk pracy w Stanach Zjednoczonych znajduje się w kategorii wysokiego ryzyka automatyzacji. Wykorzystując algorytm uczenia maszynowego do analizy 702 szczegółowych kategorii zawodowych, wykazali, że stanowiska w transporcie, logistyce, wsparciu biurowym i produkcji są szczególnie podatne na zastąpienie przez systemy zautomatyzowane.

Frey jednak wielokrotnie podkreślał, że wspomniane 47% stanowisk pracy odnosi się do technicznej możliwości automatyzacji, a nie do prognozy rzeczywistych zwolnień. Tempo i skala faktycznej adopcji technologii zależą od wielu czynników pozatechnicznych: kosztów wdrożenia, regulacji prawnych, oporu społecznego, dostępności wykwalifikowanych specjalistów zdolnych obsługiwać i serwisować zautomatyzowane systemy.

Acemoglu i Restrepo³³ zaproponowali model „wyścigu między człowiekiem a maszyną”, w którym technologia nie tylko eliminuje określone zadania, ale jednocześnie tworzy nowe kategorie zadań wymagających ludzkich kompetencji. Kluczowe pytanie

³⁰ Couldry, N., Mejias, U. A., Data colonialism: Rethinking big data's relation to the contemporary subject. *Television & New Media*, 20(4), 336–349, 2019.

³¹ Eubanks, V., *Automating Inequality: How High-Tech Tools Profile, Police, and Punish the Poor*. St. Martin's Press, 2018.

³² Frey, C. B., Osborne, M. A., The future of employment: How susceptible are jobs to computerisation? *Technological Forecasting and Social Change*, 114, 254–280, 2017.

³³ Acemoglu, D., Restrepo, P., The race between man and machine: Implications of technology for growth, factor shares, and employment. *American Economic Review*, 108(6), 1488–1542, 2018.

nie brzmi więc „czy maszyny zastąpią ludzi”, lecz „czy tempo tworzenia nowych ról nadąży za tempem automatyzacji starych”.

Narasta ogromna luka kompetencyjna (ang. *skills gap*). Kadra pracownicza operująca dziś w halach montażowych, magazynach czy call centers nie dysponuje kwalifikacjami wymaganymi przez nowe stanowiska. Potrzeba inżynierów danych, specjalistów od cyberbezpieczeństwa OT, analityków uczenia maszynowego. Programy przekwalifikowania i doskonalenia kompetencji stają się bardzo ważne nie tylko w korporacyjnym, ale również w państwowym obszarze.

Algorytmiczne uprzedzenia jako wyzwanie etyczne

Osobnym, ale powiązaniem problemem jest kwestia algorytmicznych uprzedzeń (ang. *Algorithmic Bias*). Buolamwini i Gebru³⁴ empirycznie wykazali, że komercyjne systemy rozpoznawania twarzy wykazują systematyczne dysproporcje dokładności. Najwyższe wskaźniki błędów dotyczyły ciemnoskórych kobiet (do 34,7%), podczas gdy jasnoskórzy mężczyźni klasyfikowani byli z błędem nieprzekraczającym 0,8%. Różnica rzędu kilkudziesięciu punktów procentowych w obrębie tego samego systemu jest ogromna i ma bardzo realne konsekwencje w zastosowaniach takich jak nadzór policyjny, kontrola graniczna czy weryfikacja tożsamości.

O'Neil³⁵ identyfikuje systemowe mechanizmy, przez które algorytmiczne uprzedzenia nie tylko odtwarzają, ale nasilają istniejące nierówności społeczne. Modele scoringowe stosowane w sądownictwie, rekrutacji, bankowości i ubezpieczeniach są trenowane na historycznych danych odzwierciedlających wieloletnie dyskryminacje strukturalne. Systemy naturalizują te dyskryminacje, nadając im pozór obiektywnej, matematycznej neutralności. Pozbawione przejrzystości systemy „czarnej skrzynki” (ang. *Black Box AI*) uniemożliwiają osobom dotkniętym decyzją algorytmu zrozumienie, a tym bardziej zakwestionowanie, podstaw tej decyzji.

Wyzwania technologiczne i cyberbezpieczeństwo Integracja środowisk informatycznych i przemysłowych a cyberzagrożenia

Dynamiczna migracja środowisk przemysłowych w kierunku pełnej cyfryzacji przyniosła ze sobą zupełnie nową kategorię zagrożeń. Przez dekady systemy sterowania przemysłowego (ang. *Operational Technology, OT*) funkcjonowały w izolacji fizycznej w tzw. air gap (odcięte od sieci korporacyjnych i Internetu). Ta izolacja, choć ograniczała zdolność zdalnego monitorowania i analizy, stanowiła jednocześnie skuteczną barierę bezpieczeństwa.

Boyes i in.³⁶ precyzyjnie opisali konsekwencje połączenia technologii informatycznych (Information Technology, IT) z OT. Podłączenie sterowników PLC, systemów SCADA i robotów przemysłowych do sieci, niezbędne dla realizacji wizji Przemysłu

³⁴ Buolamwini, J., Gebru, T., Gender shades: Intersectional accuracy disparities in commercial gender classification. In Conference on Fairness, Accountability and Transparency (pp. 77–91). PMLR, 2018.

³⁵ O'Neil, C., 2016, ibidem.

³⁶ Boyes, H., Hallaq, B., Cunningham, J., Watson, T., 2018, ibidem.

4.0 może dramatycznie zwiększyć powierzchnię ataku (ang. *attack surface*). Li, Xu i Zhao³⁷ znaleźli liczne luki w protokołach komunikacyjnych IoT, podkreślając, że wiele urządzeń przemysłowych projektowanych było z myślą o niezawodności, nie o bezpieczeństwie cybernetycznym.

Konsekwencje udanego ataku na system przemysłowy są nieporównywalne z konsekwencjami typowego incydentu IT. Kompromitacja serwera mailowego to utrata danych; kompromitacja sterownika turbiny to potencjalna katastrofa fizyczna taka jak np.: eksplozja, wyciek substancji toksycznych, zniszczenie kosztownej infrastruktury. Przykładowo przypadek Stuxnetu czyli złośliwego oprogramowania, które w 2010 roku zaatakowało irańskie wirówki do wzbogacania uranu pokazał, że cyberataki na infrastrukturę przemysłową nie są hipotezą akademicką, lecz realnym zagrożeniem geopolitycznym.

Podsumowanie

Przeprowadzona analiza ukazuje obraz technologii Big Data jako siły transformacyjnej o zasięgu i skali oddziaływania porównywalnej z wcześniejszymi rewolucjami przemysłowymi. Różnica jest taka, że jej oddziaływanie jest równoległe i wielosektorowe.

W przemyśle, predykcyjne utrzymanie ruchu i Cyfrowe Bliźniaki przekształcają reaktywne strategie zarządzania maszynami w proaktywne systemy samodiagnostyczne. W rolnictwie, technologie precyzyjne redukują zużycie chemikaliów o 20–40%, a w najlepszych scenariuszach nawet więcej, przyczyniając się do realnego zmniejszenia śladu ekologicznego produkcji żywności. W medycynie, integracja danych klinicznych, genomicznych i behawioralnych umożliwia identyfikację pacjentów zagrożonych pogorszeniem stanu zdrowia z wyprzedzeniem mierzonym w dniach i tygodniach.

Entuzjazm technologiczny musi być hamowany krytyczną refleksją. Kapitalizm inwigilacyjny, intersakcjonalne uprzedzenia algorytmiczne, rosnąca luka kompetencyjna na rynku pracy to realne, mierzalne problemy dnia dzisiejszego, które wymagają również zaawansowanych rozwiązań jak same technologie, które je generują.

Kilka kluczowych kierunków dalszych badań zasługuje na szczególną uwagę. Po pierwsze, problematyka „wyjaśnialnej” sztucznej inteligencji (ang. *Explainable AI*, XAI) czyli rozwój metod pozwalających na zrozumienie mechanizmów decyzyjnych modeli głębokiego uczenia bez utraty ich predykcyjnej skuteczności. Po drugie, federacyjne uczenie maszynowe (Federated Learning), umożliwiające trenowanie modeli na rozproszonych zbiorach danych bez konieczności centralizacji danych wrażliwych. Może stać się technologią potencjalnie rewolucyjnym wpływie na sektor medyczny, gdzie bariery prywatności tradycyjnie ograniczają możliwości analityczne. Po trzecie, cyberbezpieczeństwo systemów OT/IT. W miarę pogłębiania się konwergencji, potrzeba nowych architektur bezpieczeństwa staje się coraz pilniejsza.

³⁷ Li, S., Da Xu, L., Zhao, S., The internet of things: a survey. *Information Systems Frontiers*, 17(2), 243–259, 2015.

Bibliografia

- Acemoglu, D., Restrepo, P., The race between man and machine: Implications of technology for growth, factor shares, and employment. *American Economic Review*, 108(6), 1488–1542, 2018.
- Bates, D. W., Saria, S., Ohno-Machado, L., Shah, A., Escobar, G., Big data in health care: using analytics to identify and manage high-risk and high-cost patients. *Health Affairs*, 33(7), 1123–1131, 2014.
- Berckmans, D., Precision livestock farming technologies for welfare management in intensive livestock systems. *Revue scientifique et technique (International Office of Epizootics)*, 33(1), 189–196, 2014.
- Boyes, H., Hallaq, B., Cunningham, J., Watson, T., The industrial internet of things (IIoT): An analysis framework. *Computers in Industry*, 101, 1–12, 2018.
- Buolamwini, J., Gebru, T., Gender shades: Intersectional accuracy disparities in commercial gender classification. In *Conference on Fairness, Accountability and Transparency* (pp. 77–91). PMLR, 2018.
- Couldry, N., Mejias, U. A., Data colonialism: Rethinking big data's relation to the contemporary subject. *Television & New Media*, 20(4), 336–349, 2019.
- Errandonea, I., Beltrán, S., Arrizabalaga, S., Digital Twin for maintenance: A literature review. *Computers in Industry*, 123, 103316, 2020.
- Eubanks, V., *Automating Inequality: How High-Tech Tools Profile, Police, and Punish the Poor*. St. Martin's Press, 2018.
- Frey, C. B., Osborne, M. A., The future of employment: How susceptible are jobs to computerisation? *Technological Forecasting and Social Change*, 114, 254–280, 2017.
- Gandomi, A., Haider, M., Beyond the hype: Big data concepts, methods, and analytics. *International Journal of Information Management*, 35(2), 137–144, 2015.
- Goodfellow, I., Bengio, Y., Courville, A., *Deep Learning*. MIT Press, 2016.
- Grieves, M., *Digital Twin: Manufacturing Excellence through Virtual Factory Replication*. White paper, 1(2014), 1–7, 2014.
- Hashem, I. A. T., Chang, V., Anuar, N. B., Adewole, K., Yaqoob, I., Gani, A., Chiroma, H., The role of big data in smart city. *International Journal of Information Management*, 36(5), 748–758, 2016.
- Kamilaris, A., Kartakoullis, A., Prenafeta-Boldú, F. X., A review on the practice of big data analysis in agriculture. *Computers and Electronics in Agriculture*, 143, 23–37, 2017.
- Lee, J., Bagheri, B., Kao, H. A., A cyber-physical systems architecture for industry 4.0-based manufacturing systems. *Manufacturing Letters*, 3, 18–23, 2015.
- Lei, Y., Li, N., Guo, L., Li, N., Yan, T., Lin, J., Machinery health prognostics: A systematic review from data acquisition to RUL prediction. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 104, 799–834, 2017.
- Li, S., Da Xu, L., Zhao, S., The internet of things: a survey. *Information Systems Frontiers*, 17(2), 243–259, 2015.
- Marz, N., Warren, J., *Big Data: Principles and Best Practices of Scalable Realtime Data Systems*. Manning Publications, 2015.
- Mobley, R. K., *An Introduction to Predictive Maintenance* (2nd ed.). Butterworth-Heinemann, 2002.
- O'Neil, C., *Weapons of Math Destruction: How Big Data Increases Inequality and Threatens Democracy*. Crown Books, 2016.
- Raghupathi, W., Raghupathi, V., Big data analytics in healthcare: promise and potential. *Health Information Science and Systems*, 2(1), 1–10, 2014.

- Tao, F., Qi, Q., Wang, L., Nee, A. Y., Digital twins and cyber-physical systems toward smart manufacturing and industry 4.0: Correlation and comparison. *Engineering*, 5(4), 653–661, 2019.
- Wang, J., Ma, Y., Zhang, L., Gao, R. X., Wu, D., Deep learning for smart manufacturing: Methods and applications. *Journal of Manufacturing Systems*, 48, 144–156, 2018.
- Weimer, D., Scholz-Reiter, B., Shpitalni, M., Design of deep convolutional neural network architectures for automated feature extraction in industrial inspection. *CIRP Annals*, 65(1), 417–420, 2016.
- Wolfert, S., Ge, L., Verdouw, C., Bogaardt, M. J., Big data in smart farming – a review. *Agricultural Systems*, 153, 69–80, 2017.
- Wu, D., Jennings, C., Terpenney, J., Gao, R. X., Kumara, S., A comparative study on machine learning algorithms for smart manufacturing: Tool wear prediction using random forests. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 139(7), 2017.
- Zanella, A., Bui, N., Castellani, A., Vangelista, L., Zorzi, M., Internet of things for smart cities. *IEEE Internet of Things Journal*, 1(1), 22–32, 2014.
- Zambon, I., Cecchini, M., Egidi, G., Saporito, M. G., Colantoni, A., Revolution 4.0: Industry vs. Agriculture in a Future Development for SMEs. *Processes*, 7(1), 36, 2019.
- Zuboff, S., Big other: Surveillance capitalism and the prospects of an information civilization. *Journal of Information Technology*, 30(1), 75–89, 2015.

Adres do korespondencji: pdelimata@wp.pl

ORCID: Paweł Delimata 0009-0004-8490-5655
ORCID: Piotr Grochowalski 0000-0002-4124-412X
ORCID: Wojciech Koziół 0000-0003-3631-0759

WYBRANE PROBLEMY IMPLEMENTACJI ELEKTROMOBILNOŚCI W TRANSPORCIE

Grzegorz Dzieniszewski^{1,2}, Wiktoria Sasiela¹

¹ Wydział Nauk Technicznych i Sztuk Projektowych, Państwowa Akademia Nauk Stosowanych w Przemysłu

² Wydział Mechaniczno-Technologiczny, Politechnika Rzeszowska im. Ignacego Łukasiewicza w Rzeszowie

Wprowadzenie

Elektromobilność stanowi jeden z kluczowych elementów transformacji energetycznej i dekarbonizacji transportu w Europie. W Polsce rozwój tego sektora przyspieszył po 2018 roku, wraz z wdrożeniem polityk wspierających pojazdy elektryczne^{1,2}.

Rozwój elektromobilności wiąże się jednak z szeregiem wyzwań, które obejmują zarówno kwestie technologiczne, jak i infrastrukturalne³. Polska jako kraj o zróżnicowanej strukturze przestrzennej i energetycznej, stanowi szczególnie interesujący przypadek badawczy. Celem niniejszego opracowania jest kompleksowa identyfikacja oraz analiza kluczowych problemów związanych z implementacją elektromobilności w transporcie na terenie Polski. Szczególną uwagę poświęcono barierom technicznym, infrastrukturalnym i organizacyjnym wpływającym na tempo rozwoju sektora. W pracy wykorzystano analizę raportów branżowych, dokumentów rządowych oraz studia przypadków. Uzupełnieniem badań była analiza przestrzenna infrastruktury ładowania, ocena zdolności sieci elektroenergetycznych oraz czynniki ekonomiczne zgłaszane przez użytkowników.

Metodyka badań

Badania przeprowadzono w oparciu o:

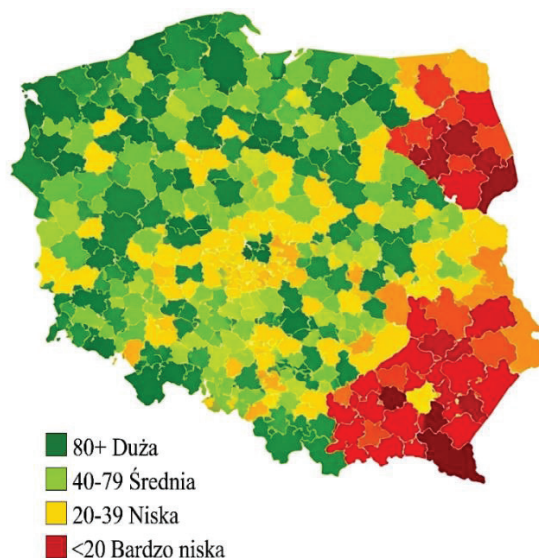
- analizę raportów branżowych (PSPA, PSE, GUS)⁴,
- analizę dokumentów rządowych (Polityka energetyczna Polski, strategię elektromobilności),
- studia przypadków wybranych regionów,
- analizę przestrzenną infrastruktury ładowania,
- analizę parametrów technicznych sieci elektroenergetycznych.

¹ Drożdż W. Elektromobilność w rozwoju miast. Warszawa: Wydawnictwo Naukowe PWN, s. 45-68, 2018.

² Rzędowski A., Sawicki B., Stępiński P. Elektromobilność – raport strategiczny. Warszawa: Instytut Jagielloński, s. 40-60, 2017.

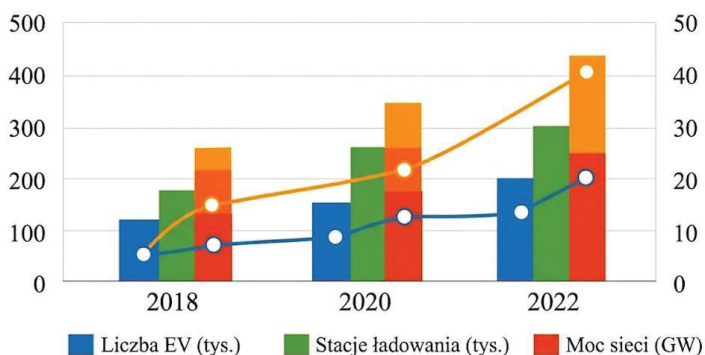
³ Praca zbiorowa. Elektromobilność w praktyce. Warszawa: Wiedza i Praktyka, s. 30-55, 2025.

⁴ Żmuda-Trzebiatowski P. Rynek paliw alternatywnych w Polsce. Warszawa: Difin, s. 85-110, 2021.



Rysunek 1. Gęstość infrastruktury ładowania w Polsce

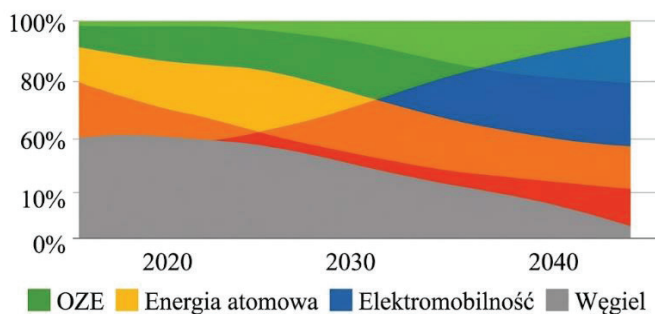
Rysunek 1 ilustruje przestrzenne zróżnicowanie gęstości stacji ładowania na terenie Polski. Najwyższa koncentracja infrastruktury występuje w centralnej i zachodniej części kraju. Regiony wschodnie oraz południowo-wschodnie charakteryzują się znacznie niższą dostępnością stacji. Wykres wskazuje na występowanie tzw. „białych plam” infrastrukturalnych. Analiza potwierdza konieczność bardziej równomiernego rozmieszczenia stacji ładowania⁵.



Rysunek 2. Analiza raportów branżowych (PSPA, PSE, GUS)

⁵ Grzywacz W. Infrastruktura transportu. Wydawnictwa Komunikacji i Łączności, s. 60-82, Warszawa 2017.

Rysunek 2 przedstawia dynamikę rozwoju elektromobilności w Polsce na podstawie danych raportowych. Widoczny jest wyraźny wzrost liczby pojazdów elektrycznych w analizowanych latach. Równolegle rośnie liczba stacji ładowania, jednak tempo ich przyrostu jest niższe niż liczby pojazdów. Wykres ukazuje również wzrost mocy systemu elektroenergetycznego, co wskazuje na konieczność dostosowania infrastruktury energetycznej. Analiza sugeruje narastającą presję na rozwój infrastruktury ładowania i sieci energetycznej⁶.



Rysunek 3. Polityka energetyczna Polski 2040 – cele i prognozy

Rysunek 3 prezentuje prognozowaną strukturę mixu energetycznego Polski do 2040 roku. Widoczny jest systematyczny spadek udziału węgla jako głównego źródła energii. Jednocześnie rośnie znaczenie odnawialnych źródeł energii oraz energii jądrowej. Elektromobilność pojawia się jako istotny element zwiększający zapotrzebowanie na energię elektryczną. Wykres wskazuje na kierunek transformacji energetycznej w stronę niskoemisyjnych źródeł energii^{7,8}.

Rysunek 4 ukazuje zróżnicowanie poziomu rozwoju elektromobilności w różnych typach regionów. Najwyższe wartości osiągają duże miasta, takie jak Warszawa, szczególnie w zakresie dostępności infrastruktury i inwestycji. Regiony wiejskie charakteryzują się najniższym poziomem rozwoju we wszystkich analizowanych kategoriach. Średnie miasta zajmują pozycję pośrednią, jednak również wykazują istotne ograniczenia infrastrukturalne. Wykres potwierdza znaczące zróżnicowanie regionalne w rozwoju elektromobilności^{9,10}.

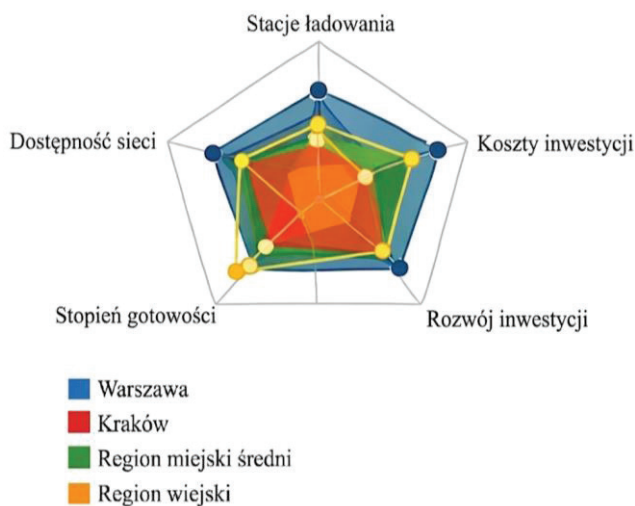
⁶ Wojewódzka-Król K., Rydzkowski W. Transport. Wydawnictwo Naukowe PWN, s. 150-175, Warszawa, 2021.

⁷ Gawlikowska-Fyk A. Transformacja energetyczna w Polsce. Polski Instytut Spraw Międzynarodowych, s. 70-95, Warszawa, 2019.

⁸ Kucowski J., Laudyn D., Przekwas M. Energetyka a środowisko. Wydawnictwo Naukowe PWN, s. 180-205, Warszawa 2019.

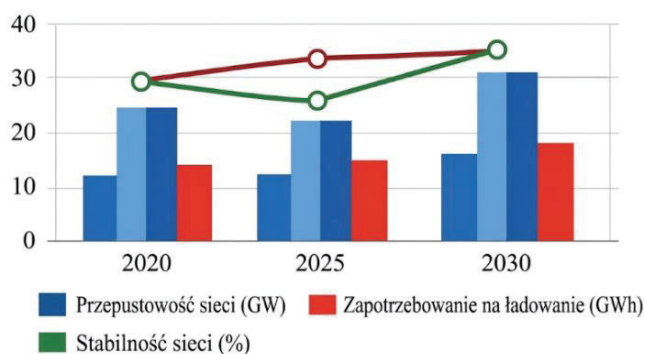
⁹ Sierpiński G. Transport i mobilność w miastach. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, s. 110-130, Gliwice, 2018.

¹⁰ Kaszubowski D. Zrównoważony transport miejski. Wydawnictwo Uniwersytetu Gdańskiego, s. 95-115, Gdańsk, 2018.



Rysunek 4. Studium przypadków regionów

Rysunek 5 przedstawia zmiany parametrów sieci elektroenergetycznej w kontekście rozwoju elektromobilności. Widoczny jest wzrost zapotrzebowania na energię elektryczną związany z rozwojem infrastruktury ładowania. Przepustowość sieci rośnie, jednak w niektórych okresach nie nadąża za rosnącym zapotrzebowaniem. Stabilność systemu elektroenergetycznego ulega niewielkim wahaniom, co wskazuje na potrzebę modernizacji. Wykres podkreśla znaczenie inwestycji w rozwój i stabilizację sieci energetycznej^{11,12}.



Rysunek 5. Parametry sieci elektroenergetycznej

¹¹ Malko J. System elektroenergetyczny – podstawy funkcjonowania. Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, s. 130-155, Wrocław, 2017.

¹² Gradziuk P. Rynek energii elektrycznej w Polsce. Difin, s. 140-165, Warszawa, 2020.

Stan rozwoju elektromobilności w Polsce

Rozwój elektromobilności w Polsce w ostatnich latach charakteryzuje się wysoką dynamiką, zarówno w zakresie liczby pojazdów elektrycznych, jak i rozbudowy infrastruktury ładowania. Analiza gęstości infrastruktury, wyrażonej liczbą stacji na 100 km² oraz na 100 tys. mieszkańców, pozwala na ocenę stopnia dostępności usług ładowania w ujęciu przestrzennym i demograficznym. Takie podejście umożliwia identyfikację obszarów o relatywnie wysokim oraz niskim poziomie rozwoju elektromobilności^{13,14}.

Tabela 1. Liczba pojazdów elektrycznych

Rok	Liczba pojazdów elektrycznych (szt.)	Dynamika wzrostu (%)
2018	5 000	-
2019	9 500	90
2020	18 000	89
2021	38 000	111
2022	62 000	63
2023	95 000	53
2024	140 000	47

Dane zaprezentowane w tabeli 1 wskazują na dynamiczny wzrost liczby pojazdów elektrycznych w Polsce w latach 2018–2024. Szczególnie wysoka dynamika wzrostu obserwowana była w latach 2019–2021, kiedy liczba pojazdów niemal podwajała się rok do roku. W kolejnych latach tempo wzrostu uległo stopniowemu obniżeniu, co jest zjawiskiem typowym dla rynków przechodzących do etapu bardziej dojrzałego rozwoju¹⁵. Mimo spadku dynamiki procentowej, przyrost liczby pojazdów w ujęciu bezwzględnym pozostaje znaczący, co świadczy o utrzymującym się trendzie wzrostowym.

Tabela 2. Rozwój infrastruktury ładowania

Region	Liczba stacji	Stacje na 100 tys. mieszkańców	Stacje na 100 km ²
Mazowieckie	420	7,8	1,2
Małopolskie	310	8,5	2,0
Dolnośląskie	280	9,2	1,5
Podkarpackie	95	4,5	0,6
Lubelskie	80	3,9	0,5
Podlaskie	60	4,2	0,4

¹³ Burniewicz J. Transport w gospodarce narodowej. Wydawnictwo Uniwersytetu Gdańskiego, s. 85-102, Gdańsk, 2020.

¹⁴ Liberadzki B., Mindur L. Transport. Funkcjonowanie i rozwój. Wydawnictwo Instytutu Technologii Eksploatacji, s. 70-90, Radom 2019.

¹⁵ Bąk M. (red.) Ekonomia transportu dla potrzeb logistyki. Wydawnictwo Uniwersytetu Gdańskiego, s. 120-135, Gdańsk, 2019.

Istotnym elementem analizy jest również rozwój infrastruktury ładowania, który nie przebiega równomiernie w skali kraju. Dane zawarte w tabeli 2 wskazują na wyraźne zróżnicowanie regionalne zarówno pod względem liczby stacji, jak i ich gęstości. Najlepiej rozwiniętą infrastrukturą charakteryzują się regiony o wysokim poziomie urbanizacji i aktywności gospodarczej, takie jak województwa mazowieckie, małopolskie i dolnośląskie. W tych obszarach odnotowuje się zarówno większą liczbę stacji, jak i wyższe wskaźniki ich dostępności w przeliczeniu na liczbę mieszkańców oraz powierzchnię. Z kolei regiony wschodniej Polski wykazują znacznie niższy poziom rozwoju infrastruktury. Niskie wartości wskaźników gęstości stacji ładowania mogą stanowić istotną barierę w upowszechnianiu pojazdów elektrycznych na tych obszarach. Dysproporcje te wynikają zarówno z uwarunkowań ekonomicznych, jak i niższego poziomu urbanizacji oraz mniejszego popytu na tego typu usługi.

Przeprowadzona analiza wskazuje, że pomimo dynamicznego wzrostu rynku elektromobilności w Polsce, jego rozwój ma charakter nierównomierny przestrzennie. W konsekwencji dalsza ekspansja sektora wymaga działań ukierunkowanych na wyrównywanie różnic regionalnych, w szczególności poprzez wsparcie inwestycji infrastrukturalnych w słabiej rozwiniętych obszarach kraju.

Analiza infrastruktury ładowania

Kolejnym istotnym aspektem analizy jest przestrzenne rozmieszczenie infrastruktury ładowania, które w Polsce wykazuje wyraźną koncentrację w dużych aglomeracjach miejskich. Obszary takie jak Warszawa, Kraków czy Wrocław stanowią główne centra rozwoju elektromobilności, co wynika z wysokiej gęstości zaludnienia, większego popytu oraz lepszej opłacalności inwestycji infrastrukturalnych. W efekcie użytkownicy pojazdów elektrycznych w tych lokalizacjach mają relatywnie łatwy dostęp do stacji ładowania, co sprzyja dalszej popularyzacji tego typu transportu. Jednocześnie w wielu regionach kraju występują tzw. „białe plamy”, czyli obszary o bardzo ograniczonej dostępności infrastruktury ładowania. Zjawisko to dotyczy przede wszystkim terenów słabiej zurbanizowanych oraz regionów o niższej aktywności gospodarczej. Braki infrastrukturalne w tych obszarach stanowią istotną barierę rozwoju elektromobilności, ograniczając mobilność użytkowników oraz zwiększając ryzyko związane z eksploatacją pojazdów elektrycznych, w szczególności w kontekście dłuższych podróży.

Tabela 3. Struktura typów stacji

Typ stacji	Udział (%)
AC (wolne)	62
DC (szybkie)	28
HPC (ultraszybkie)	10

Analiza struktury typów stacji ładowania, przedstawiona w tabeli 3, wskazuje na wyraźną dominację stacji wolnego ładowania AC, które stanowią ponad 60% całej infrastruktury. Stacje te, choć relatywnie tanie w instalacji i eksploatacji, charakteryzują się długim czasem ładowania, co ogranicza ich użyteczność w przypadku użytkowni-

ków oczekujących szybkiego uzupełnienia energii. Udział stacji szybkich DC oraz ultraszybkich HPC pozostaje znacznie niższy, co wskazuje na niedostateczny rozwój infrastruktury umożliwiającej szybkie ładowanie. Dominacja wolnych punktów ładowania wpływa negatywnie na funkcjonalność całego systemu elektromobilności, szczególnie w kontekście transportu międzyregionalnego oraz użytkowania pojazdów w trybie intensywnym. Ograniczona dostępność szybkich i ultraszybkich stacji może prowadzić do wydłużenia czasu podróży oraz obniżenia komfortu użytkowników¹⁶.

Bariery techniczne i infrastrukturalne

Zgodnie z danymi przedstawionymi w tabeli 4, kluczowe bariery techniczne wynikają przede wszystkim z ograniczeń istniejącej infrastruktury elektroenergetycznej¹⁷. W wielu regionach instalacja stacji szybkiego ładowania wymaga modernizacji sieci.

Tabela 4. Ograniczenia sieci elektroenergetycznych

Parametr	Wartość średnia
Dostępna moc przyłączeniowa (kW)	120
Zapotrzebowanie stacji HPC (kW)	350
Deficyt mocy (%)	65

Kwestia kompatybilności technologicznej stanowi istotną barierę rozwojową, wpływającą na funkcjonowanie infrastruktury ładowania. Problemy obejmują różne standardy ładowania oraz brak interoperacyjności systemów płatności. Ograniczenia związane z dostępnością i rozmieszczeniem punktów ładowania należą do najczęściej wskazywanych barier infrastrukturalnych.

Do najważniejszych barier infrastrukturalnych zalicza się w szczególności:

- nierównomierne rozmieszczenie stacji,
- brak pokrycia tras krajowych,
- niedostateczna liczba stacji dużej mocy,
- ograniczona dostępność na obszarach wiejskich.

Bariery organizacyjne i ekonomiczne

Rozwój elektromobilności napotyka na istotne bariery o charakterze zarówno ekonomicznym, jak i organizacyjnym, które ograniczają tempo jej wdrażania. Analiza kosztów infrastruktury oraz opinii użytkowników pozwala zidentyfikować kluczowe obszary wymagające interwencji w celu przyspieszenia transformacji transportu¹⁸.

¹⁶ Mindur L. Technologia transportu. Instytut Technologii Eksploatacji, s. 200-215, Warszawa-Radom, 2017.

¹⁷ Kaliski M., Staśko D. Bezpieczeństwo energetyczne Polski. Wydawnictwo AGH, s. 110-130, Kraków, 2019.

¹⁸ Krawiec F. Gospodarka energetyczna. Difin, s. 150-175, Warszawa, 2018.

Tabela 5. Koszty inwestycyjne

Element	Koszt (tys. PLN)
Stacja AC	40
Stacja DC	250
Stacja HPC	900

Dane przedstawione w tabeli 5 wskazują na znaczące zróżnicowanie kosztów inwestycyjnych w zależności od typu infrastruktury ładowania. Najniższe nakłady wymagane są w przypadku stacji AC, co sprzyja ich szerszemu zastosowaniu w przestrzeni miejskiej i przy obiektach prywatnych. Z kolei wysokie koszty instalacji stacji DC oraz szczególnie HPC stanowią istotną barierę ekonomiczną dla inwestorów, ograniczając tempo rozbudowy szybkiej infrastruktury ładowania. Może to prowadzić do nierównomiernego rozwoju sieci, w której dominują rozwiązania wolniejsze, mniej efektywne z punktu widzenia użytkownika. W konsekwencji bariera kapitałowa wpływa bezpośrednio na dostępność technologii szybkiego ładowania.

Tabela 6. Opinie użytkowników

Problem	Udział wskazań (%)
Brak stacji	72
Długi czas ładowania	65
Wysokie ceny	58
Problemy techniczne	34

Wyniki badań opinii użytkowników zestawione w tabeli 6 wskazują, że najistotniejszym problemem pozostaje niedostateczna liczba stacji ładowania, co potwierdza istnienie barier infrastrukturalnych o charakterze organizacyjnym. Wysoki odsetek wskazań dotyczących długiego czasu ładowania sugeruje również niedostosowanie obecnej infrastruktury do oczekiwań użytkowników w zakresie wygody i efektywności. Istotną rolę odgrywają także czynniki ekonomiczne, takie jak wysokie ceny korzystania z usług ładowania, które mogą ograniczać popyt na pojazdy elektryczne. Problemy techniczne, choć rzadziej wskazywane, wskazują na potrzebę poprawy niezawodności systemów. Łącznie wyniki te podkreślają konieczność równoczesnego rozwiązywania problemów infrastrukturalnych, technologicznych i kosztowych.

Studium przypadków

Duże ośrodki miejskie stanowią główne centra rozwoju elektromobilności, co wynika zarówno z wysokiego poziomu urbanizacji, jak i większej koncentracji potencjalnych użytkowników pojazdów elektrycznych. W tych obszarach obserwuje się dynamiczny rozwój infrastruktury ładowania, wspierany przez polityki samorządowe oraz inicjatywy prywatnych inwestorów. Rozbudowa sieci stacji ładowania jest często zintegrowana z systemami transportu publicznego oraz infrastrukturą parkingową, co sprzyja popula-

ryzacji elektromobilności. Pomimo relatywnie szybkiego tempa rozwoju, duże miasta napotykać istotne ograniczenia związane z przepustowością sieci elektroenergetycznej. Wysoka koncentracja punktów ładowania, szczególnie szybkich stacji DC i HPC, generuje znaczne obciążenia dla lokalnej infrastruktury energetycznej. W rezultacie konieczne stają się kosztowne inwestycje w modernizację sieci oraz wdrażanie inteligentnych systemów zarządzania energią. Ograniczenia te mogą spowalniać dalszą ekspansję infrastruktury, pomimo rosnącego zapotrzebowania ze strony użytkowników.

W przeciwieństwie do dużych aglomeracji, małe miasta oraz obszary wiejskie charakteryzują się znacznie niższym poziomem rozwoju infrastruktury ładowania pojazdów elektrycznych. Ograniczona liczba stacji wynika przede wszystkim z mniejszego popytu, a także niższej opłacalności inwestycji dla operatorów infrastruktury. W efekcie mieszkańcy tych obszarów mają utrudniony dostęp do usług ładowania, co stanowi istotną barierę w upowszechnianiu elektromobilności. Dodatkowym problemem jest rozproszenie zabudowy oraz większe odległości pomiędzy punktami ładowania, co wpływa na komfort użytkowania pojazdów elektrycznych. Ograniczenia organizacyjne obejmują również mniejszą aktywność władz lokalnych w zakresie wspierania inwestycji infrastrukturalnych oraz słabszy dostęp do środków finansowych. W konsekwencji rozwój elektromobilności na tych obszarach wymaga ukierunkowanego wsparcia publicznego oraz modeli biznesowych dostosowanych do specyfiki rynku o niższej gęstości zaludnienia.

Prognozy rozwoju

Prognozy rozwoju przedstawione w tabeli 7 wskazują na dynamiczny wzrost liczby pojazdów elektrycznych w perspektywie najbliższych lat. Zakłada się, że do 2025 roku ich liczba osiągnie poziom 200 tys., by w 2030 roku wzrosnąć trzykrotnie, a w 2035 roku podwoić się ponownie. Tak intensywna dynamika wzrostu odzwierciedla zarówno postęp technologiczny, jak i rosnącą presję regulacyjną w zakresie dekarbonizacji transportu.

Tabela 7. Prognozy rozwoju

Rok	Prognozowana liczba pojazdów	Zapotrzebowanie energii (GWh)
2025	200 000	900
2030	600 000	3 200
2035	1 200 000	7 500

Równolegle obserwowany jest znaczący wzrost zapotrzebowania na energię elektryczną, które w analizowanym okresie zwiększy się ponad ośmiokrotnie – z poziomu 900 GWh w 2025 roku do 7500 GWh w 2035 roku. Wzrost ten stanowi istotne wyzwanie dla systemu elektroenergetycznego, wymagające odpowiedniego planowania zdolności wytwórczych oraz rozbudowy infrastruktury przesyłowej i dystrybucyjnej. Szczególnego znaczenia nabiera integracja elektromobilności z odnawialnymi źródłami energii oraz rozwój technologii magazynowania energii, które mogą ograniczyć obciąż-

żenia szczytowe. Prognozowane zmiany wskazują również na konieczność dostosowania infrastruktury ładowania do rosnącej liczby użytkowników, zarówno pod względem liczby stacji, jak i ich mocy. Brak odpowiednich inwestycji w tym obszarze może prowadzić do powstawania wąskich gardeł, ograniczających dalszy rozwój rynku pojazdów elektrycznych^{19,20}.

Dyskusja

Rozwój elektromobilności stanowi złożony proces, który wymaga skoordynowanych działań w wielu obszarach, w szczególności infrastruktury transportowej oraz sektora energetycznego. Kluczowe znaczenie ma zapewnienie równoległego rozwoju sieci ładowania oraz zdolności systemu elektroenergetycznego do obsługi rosnącego zapotrzebowania na energię. Brak synchronizacji tych działań może prowadzić do istotnych ograniczeń funkcjonalnych całego systemu.

Istotnym elementem jest również modernizacja sieci elektroenergetycznej, obejmująca zarówno jej rozbudowę, jak i wdrażanie inteligentnych rozwiązań zarządzania energią. Technologie takie jak smart grid czy zarządzanie popytem mogą odegrać kluczową rolę w optymalizacji wykorzystania dostępnych zasobów oraz minimalizacji przeciążeń. Nie mniej ważne jest planowanie przestrzenne, które powinno uwzględniać rozwój infrastruktury ładowania już na etapie projektowania nowych inwestycji urbanistycznych. Integracja punktów ładowania z zabudową mieszkaniową, obiektami użyteczności publicznej oraz węzłami transportowymi może znacząco zwiększyć dostępność usług i poprawić komfort użytkowników.

W konsekwencji skuteczna transformacja w kierunku elektromobilności wymaga podejścia systemowego, obejmującego współpracę administracji publicznej, sektora prywatnego oraz operatorów systemów energetycznych.

Podsumowanie

Rozwój elektromobilności wymaga skoordynowanych działań w zakresie infrastruktury i energetyki. Kluczowe znaczenie ma modernizacja sieci oraz planowanie przestrzenne. Przedstawione analizy wskazują na szereg kluczowych wyzwań o charakterze infrastrukturalnym i systemowym.

Na podstawie przeprowadzonych badań można sformułować następujące wnioski:

1. Najistotniejszym problemem pozostaje zróżnicowanie regionalne, które prowadzi do nierównomiernego dostępu do infrastruktury oraz pogłębia dysproporcje w jej wykorzystaniu.

¹⁹ Grzywacz W. Infrastruktura transportu. Wydawnictwa Komunikacji i Łączności, s. 60-82, Warszawa, 2017.

²⁰ Popczyk J. Energetyka prosumencka. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, s. 95-120, Gliwice, 2019.

2. Równocześnie konieczna jest modernizacja sieci elektroenergetycznych, bez której integracja nowych źródeł i technologii może być ograniczona przez niewystarczającą przepustowość oraz niską elastyczność systemu.
3. Istotnym elementem transformacji jest także rozwój infrastruktury szybkiego ładowania, warunkujący efektywne funkcjonowanie nowoczesnych systemów transportowych i ich skalowalność.
4. Ponadto wymagane jest lepsze dopasowanie infrastruktury do rzeczywistych potrzeb użytkowników, co powinno uwzględniać zarówno zmieniające się wzorce mobilności, jak i lokalne uwarunkowania społeczno-gospodarcze.

Bibliografia

- Bąk M. (red.) *Ekonomika transportu dla potrzeb logistyki*. Wydawnictwo Uniwersytetu Gdańskiego, s. 120-135, Gdańsk, 2019.
- Burniewicz J. *Transport w gospodarce narodowej*. Wydawnictwo Uniwersytetu Gdańskiego, s. 85-102, Gdańsk, 2020.
- Drożdż W. *Elektromobilność w rozwoju miast*. Wydawnictwo Naukowe PWN, s. 45-68, Warszawa, 2018.
- Gawlikowska-Fyk A. *Transformacja energetyczna w Polsce*. Polski Instytut Spraw Międzynarodowych, s. 75-95, Warszawa, 2019.
- Gradziuk P. *Rynek energii elektrycznej w Polsce*. Difin, s. 140-165, Warszawa, 2020.
- Grzywacz W. *Infrastruktura transportu*. Wydawnictwa Komunikacji i Łączności, s. 60-82, Warszawa, 2017.
- Kaliski M., Staśko D. *Bezpieczeństwo energetyczne Polski*. Wydawnictwo AGH, s. 110-130, Kraków, 2019.
- Kaszubowski D. *Zrównoważony transport miejski*. Wydawnictwo Uniwersytetu Gdańskiego, s. 95-115, Gdańsk, 2018.
- Krawiec F. *Gospodarka energetyczna*, Difin, s. 150-175, Warszawa, 2018.
- Kucowski J., Laudyn D., Przekwas M. *Energetyka a środowisko*. Wydawnictwo Naukowe PWN, s. 180-205, Warszawa, 2019.
- Liberadzki B., Mindur L. *Transport. Funkcjonowanie i rozwój*. Wydawnictwo Instytutu Technologii Eksploatacji, s. 70-90, Radom, 2019.
- Malko J. *System elektroenergetyczny – podstawy funkcjonowania*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, s. 130-135, Wrocław, 2017.
- Mindur L. *Technologia transportu*. Instytut Technologii Eksploatacji, s. 200-215, Warszawa-Radom, 2017.
- Paska J. *Wytwarzanie energii elektrycznej*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, s. 210-235, Warszawa, 2018.
- Popczyk J. *Energetyka prosumencka*. Gliwice: Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, s. 95-120, 2019.
- Praca zbiorowa. *Elektromobilność w praktyce*. Wiedza i Praktyka, s. 30-55, Warszawa, 2025.
- Rzędowska A., Sawicki B., Stępiński P. *Elektromobilność – raport strategiczny*. Instytut Jagielloński, s. 40-60, Warszawa, 2017.
- Sierpiński G. *Transport i mobilność w miastach*. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, s. 110-130, Gliwice, 2018.

Wojewódzka-Król K., Rydzkowski W. Transport. Wydawnictwo Naukowe PWN, s. 150-175, Warszawa, 2021.

Żmuda-Trzebiatowski P. Rynek paliw alternatywnych w Polsce. Difin, s. 85-110, Warszawa, 2021.

Adres do korespondencji: g.dzieniszewski@pansp.pl

ORCID: Grzegorz Dzieniszewski 0000-0002-2712-1131

ORCID: Wiktoria Sasiela 0009-0002-2915-8314

TECHNOLOGICZNE UWARUNKOWANIA PRACY ELEKTROWNI WIATROWYCH

Jacek Filipkowski¹, Zbigniew Skibko², Andrzej Borusiewicz³

¹ Międzynarodowa Akademia Nauk Stosowanych w Łomży

² Politechnika Białostocka

³ Międzynarodowa Akademia Nauk Stosowanych w Łomży

Wprowadzenie

Energia wiatru od wielu lat znajduje zastosowanie w różnych obszarach, od napędu młynów i jednostek pływających po wytwarzanie energii elektrycznej. W Polsce korzystne warunki wiatrowe występują na około 40% powierzchni kraju, szczególnie w regionach północno wschodnich oraz na obszarach nadmorskich. Mimo że energia wiatrowa jest czysta środowiskowo, charakteryzuje się zmiennością czasową. W literaturze dostępnych jest wiele opracowań dotyczących energetyki wiatrowej^{1,2,3,4}. Jej zalety: m.in. zrównoważenie środowiskowe, efekty ekonomiczne, modułowość i skalowalność — przyciągają uwagę sektora biznesowego i odbiorców indywidualnych⁵.

W krajowym systemie elektroenergetycznym istotnym problemem pozostaje stabilność napięcia, której ocena wymaga szczegółowych analiz⁶. Wraz ze wzrostem mocy farm wiatrowych przyłączonych do sieci obserwuje się obniżenie stabilności napięciowej⁷. Zróżnicowanie konstrukcji turbin wymusza analizę bezwładnościowej odpowiedzi systemu na zakłócenia, zależnej od zastosowanych metod sterowania⁸. Wpływ farm

¹ de Falani, S. Y. A., González, M. O. A., Barreto, F. M., de Toledo, J. C., & Torkomian, A. L. V. Trends in the technological development of wind energy generation. *International Journal of technology management & sustainable development*, 19(1), 2020, 43-68.

² Adem A., Çolak A., Dağdeviren M. An integrated model using SWOT analysis and hesitant fuzzy linguistic term set for evaluation occupational safety risks in life cycle of wind turbine. *Saf. Sci.*, 106, 2018, pp. 184-190.

³ Hołdyński G.; Skibko Z.; Borusiewicz, A.: Impact of Wind Power Plant Operation on Voltage Quality Parameters—Example from Poland. *Energies* 2022, 15, 5573.

⁴ Filipkowski J, Skibko Z, Borusiewicz A, Romaniuk W, Pisarek Ł, Milewska AJ. Changes in Farm Supply Voltage Caused by Switching Operations at a Wind Turbine. *Energies*. 2024;17:1–20.

⁵ Brennan N., Thomas M. van Rensburg, Public preferences for wind farms involving electricity trade and citizen engagement in Ireland, *Energy Policy*, Volume 147, 2020, 111872, ISSN 0301-4215.

⁶ Skibko Z, Tymińska M, Romaniuk W, Borusiewicz A. Impact of the Wind Turbine on the Parameters of the Electricity Supply to an Agricultural Farm. *Sustainability*. 2021;13(13):1-15.

⁷ Dai, J.; Tang, Y.; Yi, J. Adaptive gains control scheme for PMSG-based wind power plant to provide voltage regulation service. *Energies* 2019, 12, 753.

⁸ Xu, B.; Zhang, L.; Yao, Y.; Yu, X.; Yang, Y.; Li, D. Virtual inertia coordinated allocation method considering inertia demand and wind turbine inertia response capability. *Energies* 2021, 14, 5002.

wiatrowych na stabilność napięciową rozpatruje się w trzech aspektach: udziału energii wiatrowej, wielkości zakłóceń oraz środków poprawy. W sieciach średniego napięcia moc przyłączanych farm jest ograniczana wymogiem utrzymania stabilności napięcia⁹.

Funkcjonowanie elektrowni wiatrowej związane jest z nieustannymi zmianami wartości mocy przez nią produkowanej, wynikającymi ze zmienności kierunku i siły wiatru. Skutkiem tych zmian jest dynamiczne oddziaływanie przyłączonej elektrowni na sieć elektroenergetyczną. Najbardziej niebezpieczne, zarówno z punktu widzenia samej elektrowni jak i sieci zasilającej, jest awaryjne zatrzymanie siłowni podczas pracy przy generacji wynoszącej 100% mocy znamionowej, wynikające na przykład z wystąpienia wiatru, którego prędkość przekracza wartość dopuszczalną dla danej turbiny lub w wyniku awarii elektrowni lub w sieci. Nie mniejszy wpływ na sieć ma również uruchomienie elektrowni przy wietrze umożliwiającym osiągnięcie mocy maksymalnej. W pracy przedstawiono wyniki badań terenowych dotyczących wpływu czynności łączeniowych w farmie wiatrowej złożonej z trzech elektrowni wiatrowych ENERCON E-66 o mocy 2 MW, na wybrane parametry stabilności i jakości napięcia.

Wymagania przepisów w zakresie dynamicznego oddziaływania elektrowni wiatrowych

Wymagania stawiane elektrowniom wiatrowym czasowo przyłączonym do sieci średniego napięcia zgodnie z normą PN – EN 50160¹⁰, Rozporządzeniem Ministra Klimatu i Środowiska¹¹ oraz Instrukcją Ruchu i Eksploatacji Sieci Dystrybucyjnych PGE S.A.¹² przedstawiono w tabeli 1. Spełnienie tych wymagań niezbędne jest do otrzymania zgody na ostateczne przyłączenie elektrowni wiatrowej oraz podpisanie umowy na dostawę energii elektrycznej.

Tabela 1. Wymagania stawiane elektrowniom wiatrowym przyłączonym do sieci

Lp.	Parametr	Wymagania
1.	Wartość napięcia zasilającego	– elektrownia wiatrowa nie powinna powodować nagłych zmian i skoków napięcia przekraczających 3 % napięcia znamionowego
2.	Harmoniczne napięcia	– wartość współczynnika THD napięcia powinna być mniejsza niż 3 % dla elektrowni wiatrowych przyłączonych do sieci o napięciu znamionowym nie wyższym niż 30 kV i wyższym niż 1 kV

Źródło: opracowanie własne na podstawie ^{10,11,12}

⁹ Vittal, E.; O'Malley, M.; Keane, A. A steady-state voltage stability analysis of power systems with high penetrations of wind. IEEE Trans. Power Syst. 2010, 25, 433–442.

¹⁰ PN-EN 50160:2010 Parametry napięcia zasilającego w publicznych sieciach rozdzielczych.

¹¹ Rozporządzenie Ministra Klimatu i Środowiska z dnia 22 marca 2023 r. w sprawie szczególnych warunków funkcjonowania systemu elektroenergetycznego (Dz.U. 2023 poz. 819).

¹² Instrukcja Ruchu i Eksploatacji Sieci Dystrybucyjnej, PGE S.A. wrzesień 2013 r. wraz z późniejszymi zmianami.

Metodyka badań

Do rejestracji zmian wartości wielkości elektrycznych zachodzących podczas czynności łączeniowych w farmie wiatrowej wykorzystano przenośny analizator jakości zasilania MAVOWATT 240 firmy GOSSEN METRAWATT, posiadający certyfikat kalibracji wydany przez Laboratorium Drantez. Analizator przeznaczony jest do pomiarów i rejestracji parametrów pracy jednofazowej lub trójfazowej sieci elektroenergetycznej zgodnie z najwyższymi przyjętymi na świecie standardami takimi jak IEC 61000-4-30 Klasa A (wszystkie wielkości mierzone), IEC 610004-7 (harmoniczne), IEC 61000-4-15 (migotanie światła - flicker), IEEE 1159, IEEE 519 i IEEE 1453 i pozwala na wykonywanie pomiarów w instalacjach o kategoriach CAT III i CAT IV.

Badaniom poddana została farma wiatrowa złożona z trzech jednostek wytwórczych typu ENERCON E-66, o następujących danych technicznych:

Wirnik:

- | | |
|-------------------------|-----------------------|
| - średnica łopat | 70,4 m, |
| - omiatana powierzchnia | 3893 m ² , |

Wieża:

- | | |
|----------------------|---------------|
| - wysokość wieży | 70 m, |
| - rodzaj konstrukcji | rura stalowa, |

Generator

- | | |
|--------------------------------|----------------|
| - typ generatora | synchroniczny, |
| - rodzaj wzbudzenia | samowzbudna, |
| - znamionowa moc czynna | 2000 kW, |
| - znamionowa moc pozorna | 2000 kVA, |
| - znamionowy współczynnik mocy | 1,0 |
| - napięcie znamionowe | 400 V, |
| - częstotliwość znamionowa | 50 Hz. |

Parametry eksploatacyjne:

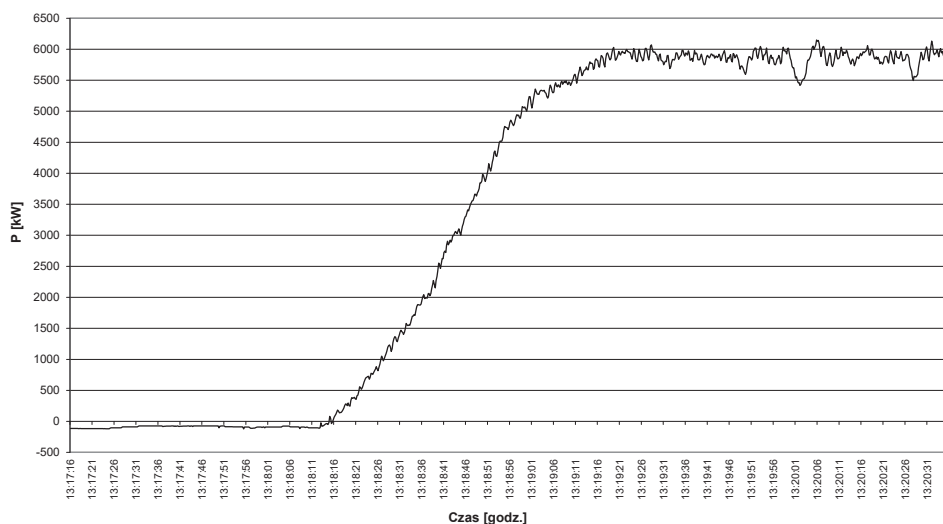
- | | |
|-----------------------|-------------------------|
| - prędkość załączania | 2,5 m·s ⁻¹ , |
| - prędkość znamionowa | 14 m·s ⁻¹ , |
| - prędkość wyłączania | 34 m·s ⁻¹ . |

Analizowana farma wiatrowa przyłączana jest do sieci elektroenergetycznej średniego napięcia (15 kV), a wartość współczynnika zwarciovego dla analizowanego punktu przyłączenia siłowni wynosi 52,5.

Badania wykonano w miejscu zainstalowania układów pomiaru energii elektrycznej wytworzonej w analizowanej farmie wiatrowej, w punkcie jej przyłączenia do sieci dystrybucyjnej 15 kV. Badania polegały na rejestracji wybranych parametrów napięcia występującego w sieci, w bezpośrednim sąsiedztwie farmy wiatrowej, podczas uruchomienia farmy wiatrowej (przy wietrze umożliwiającym osiągnięcie mocy znamionowej) oraz podczas awaryjnego wyłączenia farmy. Są to stany pracy elektrowni, które wywołują największy wpływ na zmianę wartości napięcia w punkcie ich przyłączenia.

Analiza wyników badań

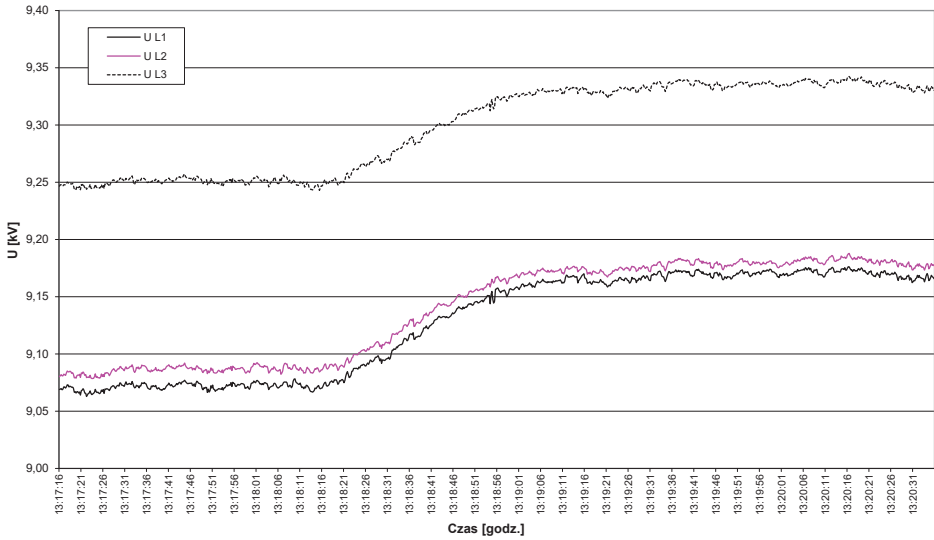
Przebieg zmian wartości napięć w poszczególnych fazach (UL1, UL2, UL3), napięcia przewodowego (UL12, UL13, UL23), mocy czynnej trójfazowej (P) oraz współczynnika całkowitego odkształcenia napięcia (THDU), zarejestrowany podczas rozruchu farmy wiatrowej przy prędkości wiatru przekraczającej wartość, przy której osiągnięta jest moc znamionowa jednostki, przedstawiono na rysunkach 1-4. Zarejestrowane przebiegi analizowanych wielkości podczas awaryjnego odstawienia farmy wiatrowej przedstawiono na rysunkach 5-8.



Rysunek 1. Przebieg zmian wartości mocy czynnej trójfazowej na szynach 15 kV zarejestrowany podczas uruchomienia farmy wiatrowej

Opracowanie własne

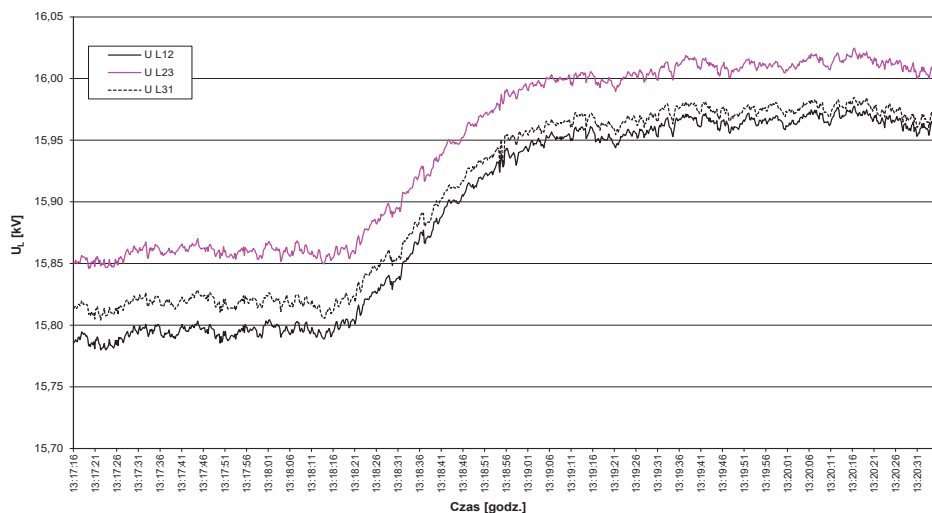
Rysunek 1 przedstawia dynamiczny przebieg zmian trójfazowej mocy czynnej na szynach 15 kV w przedziale czasowym obejmującym moment uruchomienia farmy wiatrowej. Początkowo moc utrzymuje się blisko zera, co odpowiada stanowi przed synchronizacją i wprowadzeniem turbiny do pracy. Moc ujemna wynika z pracy urządzeń potrzeb własnych elektrowni. Około godziny 13:18:18 obserwuje się gwałtowny wzrost wartości mocy, charakterystyczny dla procesu załączenia generatora. Po osiągnięciu poziomu około 6 MW moc stabilizuje się, wykazując jedynie niewielkie fluktuacje wynikające z naturalnych zmian prędkości wiatru oraz działania układów regulacji.



Rysunek 2. Przebieg zmian wartości napięć doziemnych w poszczególnych fazach zarejestrowany na szynach 15 kV podczas uruchomienia farmy wiatrowej

Opracowanie własne

W przebiegu napięć doziemnych zarejestrowanych na szynach 15 kV podczas uruchomienia farmy (rys. 2) widoczna jest stabilna, lecz wyraźnie zróżnicowana charakterystyka poszczególnych faz. W całym analizowanym przedziale czasowym wartości napięć mieszczą się w zakresie od około 9,05 kV do 9,35 kV, przy czym faza L1 utrzymuje najniższy poziom, faza L2 pozostaje pośrednia, a faza L3 osiąga zdecydowanie wyższe wartości. Początkowo napięcia kształtują się odpowiednio w przybliżeniu na poziomie 9,05 kV dla L1, 9,15 kV dla L2 oraz około 9,30 kV dla L3. Wraz z postępowaniem procesu uruchamiania elektrowni wiatrowej obserwuje się ich stopniowy, łagodny wzrost – pod koniec rejestracji wartości napięć rosną odpowiednio do około 9,15 kV, 9,25 kV i 9,38 kV. Brak gwałtownych skoków, zapadów czy asymetrii wskazuje na prawidłowy przebieg procesu rozruchu. Całość przebiegu potwierdza, że proces uruchomienia nie wywołał istotnych perturbacji w poziomach napięć doziemnych, a układ sieciowy zachował pełną stabilność.

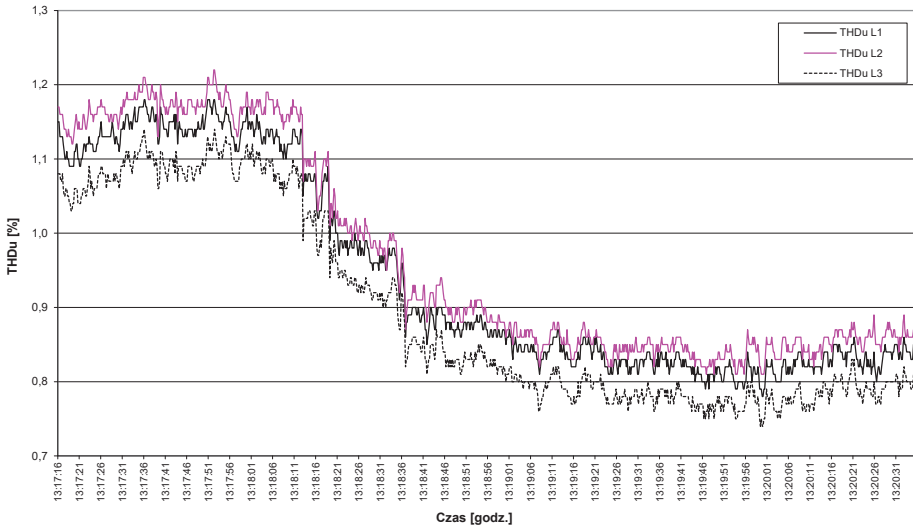


Rysunek 3. Przebieg zmian wartości napięć przewodowych zarejestrowany na szynach 15 kV podczas uruchomienia farmy wiatrowej

Opracowanie własne

W przebiegu napięć przewodowych (rys. 3) zarejestrowanych na szynach 15 kV podczas uruchomienia farmy widoczna jest stabilna, lecz wyraźnie zróżnicowana charakterystyka poszczególnych napięć. Wartości napięć mieszczą się w zakresie od około 15,75 kV do 16,05 kV, przy czym najwyższy poziom utrzymuje napięcie międzyfazowe L23, natomiast napięcia L12 i L31 pozostają nieco niższe, zachowując przy tym zbliżony przebieg. Wraz ze wzrostem mocy generowanej przez farmę wiatrową obserwuje się ich stopniowy wzrost – pod koniec pomiaru wartości osiągają około 15,98 kV. Różnice pomiędzy poszczególnymi napięciami przewodowymi pozostają również niewielkie i potwierdzają, że uruchomienie elektrowni nie spowodowało zakłóceń w poziomach napięć międzyfazowych, a sieć zachowała pełną stabilność operacyjną.

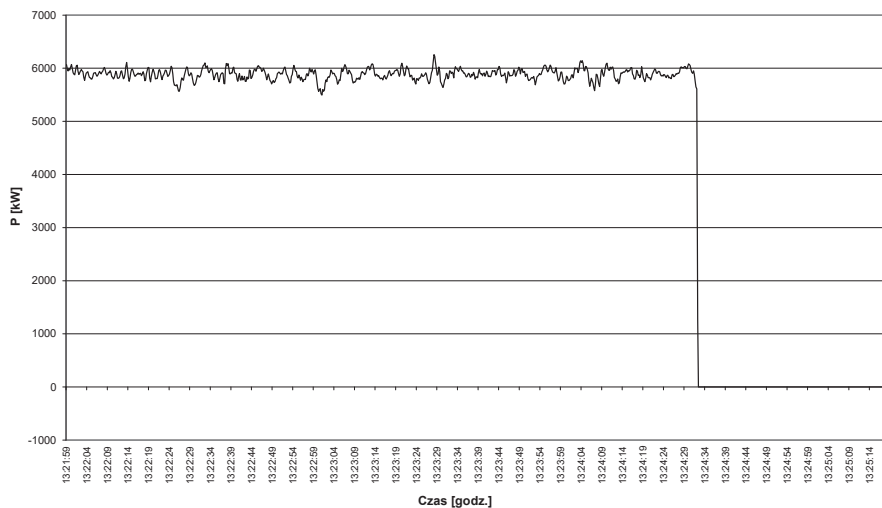
Przebieg współczynnika odkształcenia napięcia THDu (rys. 4) zarejestrowany na szynach 15 kV podczas uruchomienia farmy wykazuje wyraźną zależność od zmian mocy czynnej obserwowanych w tym samym przedziale czasowym. W początkowej fazie pomiaru wartości THDu dla wszystkich trzech faz utrzymują się na poziomie około 1–1,2%, co odpowiada stanowi sprzed załączenia generatora, gdy układ pracuje w warunkach ustalonych i obciążenie sieci nie ulega gwałtownym zmianom. Wraz ze wzrostem mocy generowanej przez elektrownie wiatrowe współczynnik THDu zaczyna wyraźnie spadać do poziomu 0,80–0,90%, po czym stabilizuje się i utrzymuje na tym poziomie do końca rejestracji. Wraz z załączeniem farmy do sieci następuje poprawa jakości napięcia wynikająca z lokalnego zwiększenia sztywności układu oraz częściowej kompensacji odkształceń harmoniczných przez pracujący generator. Spadek THDu koreluje więc bezpośrednio z momentem wzrostu mocy czynnej — im większy udział elektrowni w zasilaniu lokalnej sieci, tym mniejsze względne znaczenie harmoniczných generowanych przez odbiorniki.



Rysunek 4. Przebieg zmian wartości współczynnika odkształcenia napięcia (THD_U) zarejestrowany na szynach 15 kV podczas uruchomienia farmy wiatrowej

Opracowanie własne

W przebiegu mocy czynnej trójfazowej (rys. 5) zarejestrowanym na szynach 15 kV podczas awaryjnego wyłączenia farmy wiatrowej widoczna jest charakterystyczna sekwencja zdarzeń odzwierciedlająca nagłe odstawienie generatora od sieci. W pierwszej części rejestracji moc utrzymuje się na poziomie około 6 MW, wykazując jedynie niewielkie wahania typowe dla pracy farmy wiatrowej w warunkach ustalonych. Stabilność ta wskazuje, że do momentu wyłączenia układ pracował prawidłowo, a generacja była utrzymywana na stałym poziomie. Następnie wystąpiła szybka zmiana generowanej mocy, jednoznacznie wskazująca na natychmiastowe odłączenie generatora od sieci, charakterystyczne dla wystąpienia nagłego zakłócenia wymagającego natychmiastowego wyłączenia jednostki. Brak fazy stopniowego obniżania mocy potwierdza, że nie był to proces kontrolowanego zjazdu, lecz wyłączenie awaryjne. Przebieg ten pozostaje w wyraźnym kontraście do wykresu z procesu uruchomienia farmy wiatrowej, gdzie obserwowano gwałtowny wzrost mocy i jej późniejszą stabilizację. W przypadku awarii dynamika jest odwrotna: stabilna generacja zostaje nagle przerwana, a moc spada niemal skokowo do zera. Taki charakter zmian jest typowy dla działania zabezpieczeń nadprądowych, nadnapięciowych, mechanicznych lub systemów wykrywających utratę synchronizmu.

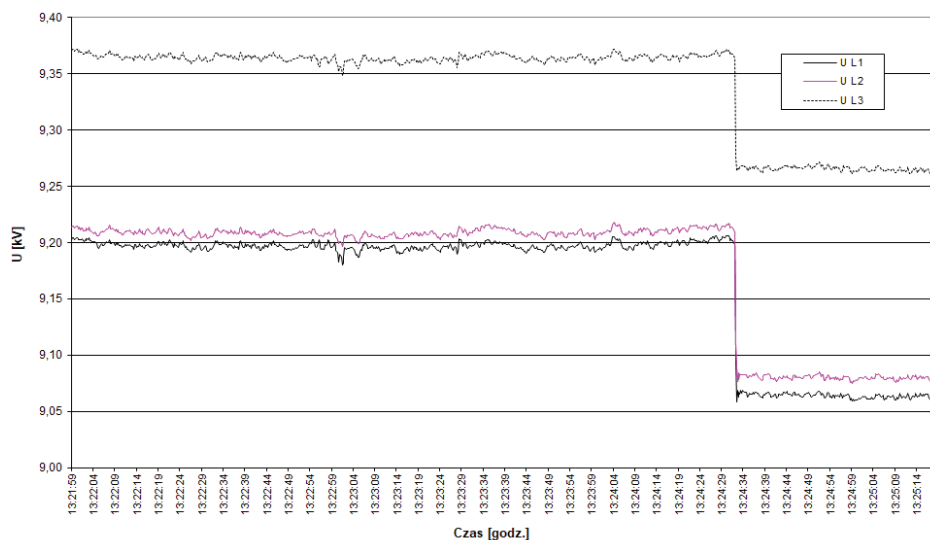


Rysunek 5. Przebieg zmian wartości mocy czynnej trójfazowej na szynach 15 kV zarejestrowany podczas awaryjnego wyłączenia farmy wiatrowej

Opracowanie własne

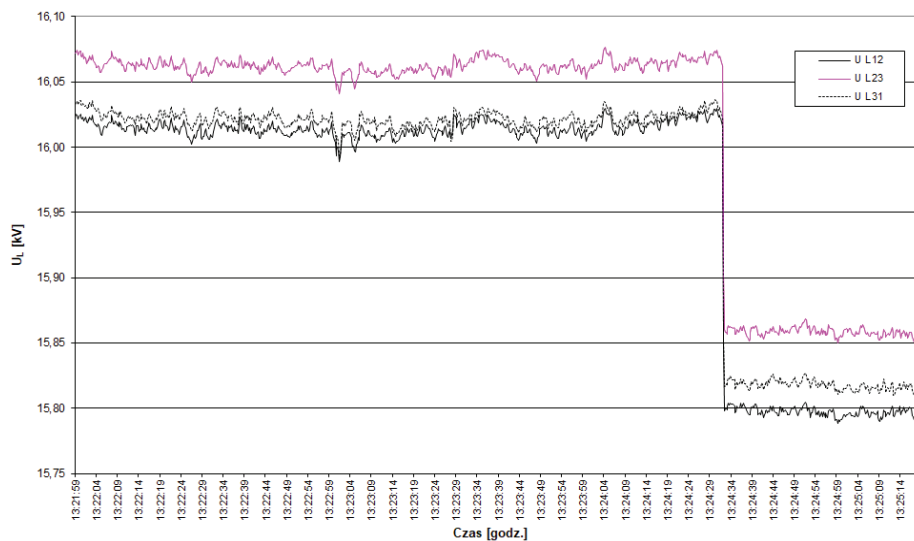
Przebieg napięć doziemnych zarejestrowany na szynach 15 kV podczas awaryjnego wyłączenia farmy wiatrowej (rys. 6) wykazuje wyraźną korelację z nagłym zanikiem mocy czynnej przedstawionym na rysunku 5. W pierwszej części rejestracji napięcia we wszystkich trzech fazach pozostają stabilne: faza L3 utrzymuje poziom około 9,36 kV, a fazy L2 i L1 około 9,2 kV. W momencie awaryjnego wyłączenia, na wykresie napięć doziemnych pojawia się jednoczesny, skokowy spadek wartości we wszystkich fazach. Charakter tego zjawiska — nagły, równoczesny i o zbliżonej amplitudzie — jednoznacznie wskazuje na reakcję sieci na natychmiastowe odłączenie generatora. Po odstawieniu farmy, napięcia stabilizują się na nowych, niższych poziomach, co odzwierciedla zmianę warunków pracy sieci po utracie lokalnego źródła generacji. Całość przebiegu potwierdza, że awaryjne wyłączenie farmy wywołało krótkotrwałe, lecz wyraźne zaburzenie poziomu napięć, typowe dla nagłej zmiany bilansu mocy w sieci średniego napięcia.

Przebieg napięć przewodowych (rys. 7) zarejestrowany na szynach 15 kV podczas awaryjnego wyłączenia farmy wiatrowej wykazuje bardzo wyraźną zależność od zmian mocy czynnej (rys. 5) oraz od zachowania napięć doziemnych (rys. 6). W pierwszej części rejestracji wszystkie trzy napięcia międzyfazowe - L12, L23 i L31 - utrzymują się na stabilnym poziomie około 16,05 kV, z niewielkimi różnicami pomiędzy poszczególnymi parami fazowymi. W momencie awaryjnego wyłączenia, na wykresie napięć przewodowych pojawia się jednoczesny, skokowy spadek wartości we wszystkich trzech parach fazowych do wartości rzędu 15,8–15,86 kV. Po odstawieniu farmy napięcia przewodowe stabilizują się na nowych, niższych poziomach, podobnie jak napięcia doziemne. W przeciwieństwie do przebiegów z procesu rozruchu, gdzie napięcia rosły wraz ze wzrostem mocy, tutaj obserwujemy odwrotną dynamikę: nagły zanik generacji skutkuje natychmiastowym obniżeniem napięć zarówno przewodowych, jak i doziemnych.



Rysunek 6. Przebieg zmian wartości napięć doziemnych w poszczególnych fazach zarejestrowany na szynach 15 kV podczas awaryjnego wyłączenia farmy wiatrowej

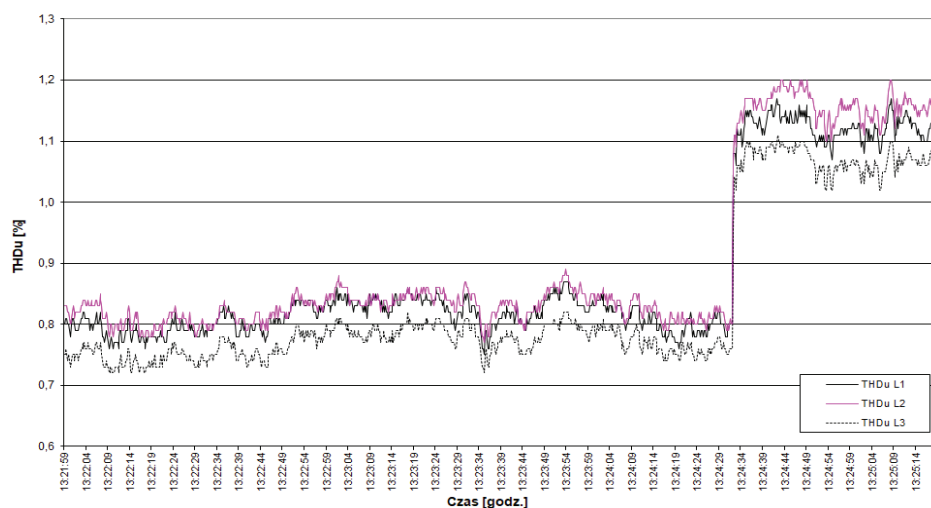
Opracowanie własne



Rysunek 7. Przebieg zmian wartości napięć przewodowych zarejestrowany na szynach 15 kV podczas awaryjnego wyłączenia farmy wiatrowej

Opracowanie własne

Przebieg współczynnika odkształcenia napięcia THDu (rys. 8) zarejestrowany na szynach 15 kV podczas awaryjnego wyłączenia farmy wiatrowej wykazuje wyraźną i bezpośrednią zależność od zmian mocy czynnej przedstawionych na rysunku 5. W pierwszej części rejestracji wartości THDu utrzymują się na stabilnym, niskim poziomie około 0,80–0,85%, co odpowiada okresowi normalnej pracy farmy, gdy generacja mocy wynosi około 6 MW i nie występują żadne zakłócenia w pracy układu. W momencie awaryjnego wyłączenia, na wykresie THDu pojawia się nagła reakcja — współczynnik odkształcenia napięcia skokowo wzrasta do około 1,1%, co stanowi wzrost rzędu 30–40%. Zjawisko to jest typowe dla sytuacji, w której lokalne źródło generacji zostaje nagle odłączone, a sieć traci część swojej sztywności, przez co wzrasta podatność na odkształcenia harmoniczne generowane przez odbiorniki. Po wyłączeniu farmy wartości THDu stabilizują się na nowym, wyższym poziomie, co potwierdza trwałą zmianę warunków pracy sieci po utracie generatora.



Rysunek 8. Przebieg wartości współczynnika odkształcenia napięcia (THDu) zarejestrowanego na szynach 15 kV podczas awaryjnego wyłączenia farmy wiatrowej

Opracowanie własne

Podsumowanie

W fazie rozruchu farmy wiatrowej (rys. 1–4) obserwuje się gwałtowny wzrost mocy czynnej z wartości bliskich zeru do około 6 MW, po czym moc stabilizuje się na stałym poziomie. Towarzyszą temu łagodne, stopniowe wzrosty napięć doziemnych i przewodowych, co świadczy o zwiększeniu sztywności lokalnej sieci po włączeniu generatorów. Jednocześnie współczynnik THDu wyraźnie maleje — z poziomu około 1,1–1,2% do około 0,8–0,9% — co potwierdza, że pracujące turbiny poprawiają jakość napięcia, redukując względny udział harmonicznych w punkcie przyłączenia. Odwrotną dynamikę obserwuje się podczas awaryjnego wyłączenia farmy (rys. 5–8). Stabilna generacja mocy na poziomie około 6 MW zostaje nagle przerwana, a moc spada skokowo do

wartości bliskiej zeru. W tym samym momencie na wykresach napięć doziemnych i przewodowych pojawia się jednoczesny, wyraźny spadek wartości — odpowiednio o około 0,12–0,15 kV dla napięć doziemnych i o około 0,10–0,15 kV dla napięć przewodowych. Jest to typowa reakcja sieci na utratę lokalnego źródła generacji, która powoduje zmniejszenie sztywności układu i większą podatność na zmiany obciążenia. Współczynnik THDu reaguje odwrotnie niż podczas rozruchu: jego wartości rosną skokowo z około 0,8% do około 1,1%, co odzwierciedla pogorszenie jakości napięcia po odłączeniu generatorów. Całość analizy wskazuje na spójne zachowanie sieci średniego napięcia w odpowiedzi na zmiany stanu pracy elektrowni wiatrowej. Uruchomienie farmy wiatrowej stabilizuje parametry napięciowe i poprawia jakość energii, natomiast jej nagłe wyłączenie prowadzi do krótkotrwałego pogorszenia tych parametrów.

Bibliografia

- Adem A., Çolak A., Dağdeviren M. An integrated model using SWOT analysis and hesitant fuzzy linguistic term set for evaluation occupational safety risks in life cycle of wind turbine. *Saf. Sci.*, 106, 2018, pp. 184–190.
- Brennan N., Thomas M. van Rensburg, Public preferences for wind farms involving electricity trade and citizen engagement in Ireland, *Energy Policy*, Volume 147, 2020, 111872, ISSN 0301-4215.
- Dai, J.; Tang, Y.; Yi, J. Adaptive gains control scheme for PMSG-based wind power plant to provide voltage regulation service. *Energies* 2019, 12, 753.
- de Falani, S. Y. A., González, M. O. A., Barreto, F. M., de Toledo, J. C., & Torkomian, A. L. V. Trends in the technological development of wind energy generation. *International Journal of technology management & sustainable development*, 19(1), 2020, 43–68.
- Filipkowski J, Skibko Z, Borusiewicz A, Romaniuk W, Pisarek Ł, Milewska AJ. Changes in Farm Supply Voltage Caused by Switching Operations at a Wind Turbine. *Energies*. 2024;17:1–20.
- Hołdyński G.; Skibko Z.; Borusiewicz, A.: Impact of Wind Power Plant Operation on Voltage Quality Parameters—Example from Poland. *Energies* 2022, 15, 5573.
- Skibko Z, Tymińska M, Romaniuk W, Borusiewicz A. Impact of the Wind Turbine on the Parameters of the Electricity Supply to an Agricultural Farm. *Sustainability*. 2021;13(13):1–15.
- Vittal, E.; O'Malley, M.; Keane, A. A steady-state voltage stability analysis of power systems with high penetrations of wind. *IEEE Trans. Power Syst.* 2010, 25, 433–442.
- Xu, B.; Zhang, L.; Yao, Y.; Yu, X.; Yang, Y.; Li, D. Virtual inertia coordinated allocation method considering inertia demand and wind turbine inertia response capability. *Energies* 2021, 14, 5002.
- PN-EN 50160:2010 Parametry napięcia zasilającego w publicznych sieciach rozdzielczych. Rozporządzenie Ministra Klimatu i Środowiska z dnia 22 marca 2023 r. w sprawie szczególnych warunków funkcjonowania systemu elektroenergetycznego (Dz.U. 2023 poz. 819).
- Instrukcja Ruchu i Eksploatacji Sieci Dystrybucyjnej, PGE S.A. wrzesień 2013 r. wraz z późniejszymi zmianami.

Adres do korespondencji: filipkowski.j@gmail.com

ORCID: Jacek Filipkowski 0009-0002-6491-4736

ORCID: Zbigniew Skibko 0000-0002-5238-6019

ORCID: Andrzej Borusiewicz 0000-0002-1407-7530

KIMI K2 THINKING JAKO WSPARCIE OBLICZEŃ ŚLADU WĘGLOWEGO (GHG PROTOCOL) W KONTEKŚCIE PASZPORTU BATERII UE

Jakub St. Gajda¹, Krzysztof Molenda¹, Karolina Furyk-Grabowska¹, Marcin Mirski¹

¹ Katedra Inżynierii Produkcji Logistyki i Informatyki Stosowanej, Uniwersytet Rolniczy w Krakowie

Wprowadzenie

Europejski Zielony Ład oraz polityka „Fit for 55” sprawiają, że redukcja emisji gazów cieplarnianych staje się nie tylko postulatem środowiskowym, lecz także twardym wymogiem regulacyjnym i rynkowym. Szczególna rola przypada bateriom – jako kluczowej technologii elektryfikacji transportu, magazynowania energii odnawialnej i stabilizacji systemu elektroenergetycznego. W konsekwencji to właśnie sektor baterijny został w Unii Europejskiej objęty jednymi z najbardziej szczegółowych obowiązków dotyczących raportowania wpływu na klimat w całym cyklu życia produktu¹.

Z perspektywy polityki klimatycznej szczególnie istotny jest transport: według analiz Europejskiej Agencji Środowiska odpowiada on za znaczącą część unijnych emisji, a elektryfikacja floty jest jednym z głównych narzędzi ich ograniczania. Jednocześnie produkcja baterii – zwłaszcza litowo-jonowych – jest procesem energochłonnym i materiałochłonnym, a więc potencjalnie wysokoemisyjnym. W literaturze LCA dla baterii spotyka się szeroki zakres wyników (rzędu dziesiątek kilogramów CO_{2e} na 1 kWh pojemności), zależny m.in. od miksów energetycznych, chemii ogniwa, skali produkcji i założeń dotyczących końca życia^{2,3}.

W tym kontekście Unia Europejska wprowadziła koncepcję Cyfrowego Paszportu Baterii (Digital Battery Passport, DBP), który ma zapewnić porównywalność, przejrzystość i weryfikowalność danych środowiskowych oraz materiałowych. Dla producentów oznacza to konieczność zbudowania łańcucha danych – od dostawców surowców i komponentów, po własne procesy wytwarzania – i przedstawienia obliczeń śladu węglowego w ustandaryzowanej formie, możliwej do audytu¹.

¹ Rozporządzenie Parlamentu Europejskiego i Rady (UE) 2023/1542 z dnia 12 lipca 2023 r. w sprawie baterii i zużytych baterii, zmieniające dyrektywę 2008/98/WE i rozporządzenie (UE) 2019/1020 oraz uchylające dyrektywę 2006/66/WE, EUR-Lex, nr L 191, s. 1-117, 2023.

² European Environment Agency. Electric vehicles from life cycle and circular economy perspectives. EEA Report, nr 13/2018, 2018.

³ Ellingsen L.A.-W., Majeau-Bettez G., Singh B., Srivastava A.K., Valøen L.O., Strømman A.H. Life Cycle Assessment of a Lithium-Ion Battery Vehicle Pack. Journal of Industrial Ecology, nr 1(18), s. 113-124, DOI: 10.1111/jiec.12072, 2014.

Wprowadzenie Paszportu Baterii UE wymaga jednocześnie spojrzenia na regulacje, metodologię obliczeń oraz realia wdrożenia po stronie firm. Dlatego w tekście zestawiono ramy prawne i harmonogram wdrażania z metodyką liczenia śladu węglowego baterii, opartą na podejściu PEF/LCA oraz standardach Greenhouse Gas Protocol (GHG). Osobno zwrócono uwagę na bariery — od kosztów pozyskania danych i narzędzi, po konieczność zapewnienia spójnej, gotowej do późniejszych audytów dokumentacji. W tym kontekście zaproponowano również praktyczny kierunek wsparcia: wykorzystanie modeli językowych klasy LLM (na przykładzie KIMI K2 Thinking) do automatyzacji obliczeń i pracy z dokumentacją, ale z wyraźnym naciskiem na sprawdzalność, transparentność i możliwość odtworzenia wyników.

Celem niniejszej pracy jest uporządkowanie zależności pomiędzy wymaganiami regulacyjnymi Paszportu Baterii UE, logiką obliczeń śladu węglowego w ujęciu PEF/LCA oraz praktyką raportowania według Greenhouse Gas Protocol. Zaproponowano inżynierski sposób organizacji obliczeń jako powtarzalnego, odtwarzalnego pipeline'u analitycznego, obejmującego jawne założenia, walidację danych wejściowych oraz kontrolę spójności wyników. Wprowadzono także perspektywę kosztowo-wdrożeniową, wskazując typowe bariery po stronie przedsiębiorstw (dane, narzędzia, kompetencje, interoperacyjność i audyt).

Na tym tle przedstawiono rolę modeli językowych klasy LLM jako narzędzi wspierających automatyzację pracy analitycznej i dokumentacyjnej, a nie jako „źródła” wyników. W szczególności omówiono, w jaki sposób KIMI K2 w trybie Thinking, może wspierać przygotowanie kodu, standaryzację opisów, generowanie artefaktów raportowych oraz pracę z wymaganiami, przy zachowaniu rygoru weryfikowalności. Zaproponowane podejście akcentuje możliwość odtworzenia wyników oraz utrzymanie ścieżki dowodowej (dane–założenia–obliczenia–raport) istotnej w procesie weryfikacji. Całość stanowi ramę postępowania, którą można adaptować do różnych organizacji i przypadków użycia, zależnie od dostępności danych i dojrzałości procesów.

Paszport Baterii UE: kontekst regulacyjny i wymogi

Rozporządzenie (UE) 2023/1542 ustanawia ramy zrównoważonego zarządzania bateriami w całym cyklu życia – od projektowania i wprowadzania do obrotu, przez użytkowanie, aż po zbiórkę i recykling. W odróżnieniu od wcześniejszych regulacji, akt ten silnie akcentuje kwestie klimatyczne: nakłada obowiązek deklarowania śladu węglowego dla wybranych kategorii baterii oraz wprowadza mechanizmy, które w kolejnych etapach mają prowadzić do porównywalności, a docelowo także do ograniczeń rynkowych dla produktów najbardziej emisyjnych.

W praktyce, regulacja obejmuje m.in. baterie do pojazdów elektrycznych (EV), baterie przemysłowe o pojemności powyżej 2 kWh oraz baterie do lekkich środków transportu (LMT). Oznacza to, że obowiązki dotyczą zarówno producentów ogniw i pakietów bateryjnych, jak i szerokiego grona podmiotów w łańcuchu dostaw – w tym dostawców materiałów aktywnych, elektrolitu, aluminium, miedzi czy usług recyklingu. Tak szeroki zakres ma ograniczyć ryzyko „przerzucania” emisji na wcześniejsze ogniwa łańcucha wartości i zapewnić rzeczywistą przejrzystość.

Warto podkreślić, że regulacja nie ogranicza się do samego „policzenia” emisji, lecz buduje cały system zarządzania informacją środowiskową. Deklaracja śladu węglowego ma być porównywalna pomiędzy wytwórcami, a więc wymaga ujednoliconych definicji granic systemu, zasad alokacji, założeń dotyczących miksu energetycznego oraz jakości danych. Z punktu widzenia rynku, oznacza to przesunięcie ciężaru z deklaracji marketingowych na dane możliwe do weryfikacji przez podmioty trzecie. W konsekwencji, ślad węglowy staje się parametrem technicznym, który – podobnie jak pojemność czy trwałość cykliczna – będzie wpływał na ocenę produktu i decyzje zakupowe w łańcuchu B2B^{4,5}.

Drugim, równie istotnym celem rozporządzenia jest ograniczenie ryzyk środowiskowych i społecznych w łańcuchu wartości baterii. Wymogi dotyczące transparentności surowcowej i odpowiedzialnego pozyskiwania materiałów (np. kobaltu, niklu czy litu) tworzą ramę, w której informacja o emisjach może być powiązana z informacją o pochodzeniu i przetwarzaniu materiałów. Takie podejście sprzyja integracji obliczeń śladu węglowego z szerszym systemem „due diligence” oraz raportowania ESG. W praktyce, oznacza to konieczność budowy spójnych procesów gromadzenia danych od dostawców, wraz z regułami walidacji i kontrolą wersji danych, aby deklaracje były stabilne w czasie i odporne na błędy.

Cyfrowy Paszport Baterii (DBP) jest praktycznym nośnikiem danych wymaganych przez rozporządzenie. Ma formę cyfrowego zbioru informacji, powiązanego z konkretną baterią (lub systemem bateryjnym) i udostępnianego poprzez identyfikator – w praktyce najczęściej kod QR umieszczany na etykiecie. Regulacja zakłada wielopoziomowy dostęp do informacji: część danych ma charakter publiczny (np. podstawowe parametry), inne są dostępne selektywnie dla uprawnionych interesariuszy, w tym organów nadzoru i recyklerów⁶.

W ujęciu informacyjnym DBP pełni funkcję „pomostu” między LCA a zarządzaniem łańcuchem dostaw: pozwala nie tylko zadeklarować wynik, lecz także wykazać jego pochodzenie, jakość danych i zgodność z metodologią. Dla rynku oznacza to wzrost przejrzystości, a dla producentów – konieczność rozwinięcia kompetencji w obszarze zarządzania danymi środowiskowymi, audytu i raportowania⁷.

Metodyka obliczania śladu węglowego baterii

W wymiarze metodycznym Unia Europejska opiera obliczenia śladu węglowego baterii na podejściu oceny cyklu życia (Life Cycle Assessment, LCA) zgodnym z norma-

⁴ Rozporządzenie Parlamentu Europejskiego i Rady (UE) 2023/1542 z dnia 12 lipca 2023 r. w sprawie baterii i zużytych baterii, zmieniające dyrektywę 2008/98/WE i rozporządzenie (UE) 2019/1020 oraz uchylające dyrektywę 2006/66/WE, EUR-Lex, nr L 191, s. 1-117, 2023.

⁵ Parlament Europejski i Rada (UE). Rozporządzenie 2023/1542 w sprawie baterii i zużytych baterii. EUR-Lex, nr L 191, s. 1-117, 2023.

⁶ Battery Pass. Battery Passport Technical Guidance. Battery Pass Consortium, 2024.

⁷ European Commission. Annexes to the Proposal for a Regulation of the European Parliament and of the Council concerning batteries and waste batteries. COM (2020) 798 final, 2020.

mi ISO 14040/14044, doprecyzowanym przez ramy Environmental Footprint (w tym Product Environmental Footprint, PEF). Celem PEF jest zwiększenie porównywalności wyników pomiędzy produktami tej samej kategorii poprzez ujednolicenie kluczowych założeń: granic systemu, hierarchii alokacji, wymogów jakości danych i sposobu raportowania.

W przypadku baterii, granice systemu zwykle przyjmują formę „cradle-to-gate” rozszerzonego o scenariusze końca życia i recyklingu (z pominięciem fazy użytkowania, która zależy od warunków eksploatacyjnych i miks energetycznego użytkownika). Takie podejście ma zaletę regulacyjną: producent odpowiada za to, co kontroluje (materiały, dostawcy, wytwarzanie), a nie za emisje po stronie użytkownika⁸.

W praktyce LCA dla baterii wymaga precyzyjnego zdefiniowania jednostki funkcjonalnej oraz przepływu referencyjnego. Dla porównań rynkowych szczególnie istotne jest, aby jednostka odzwierciedlała użyteczność produktu (np. 1 kWh pojemności użytkowej dostarczonej w określonym reżimie pracy) i była spójna z założeniami trwałości oraz degradacji. Niewielkie różnice w definicji – takie jak przyjęta głębokość rozładowania, temperatura pracy czy liczba cykli – mogą prowadzić do istotnie różnych wyników, mimo że dotyczą tego samego typu baterii. Dlatego standardy ISO oraz wytyczne PEF/LCA kładą nacisk na jednoznaczne opisanie scenariusza użytkowania i parametrów technicznych, które mają wpływ na wynik emisji przypisanej do jednostki funkcjonalnej.

Drugim newralgicznym obszarem jest alokacja emisji w procesach współprodukcyjnych oraz modelowanie recyklingu. W łańcuchu wartości baterii występują procesy, w których powstaje więcej niż jeden produkt (np. rafinacja metali), a także procesy odzysku, które mogą „kredytować” system za uniknięcie produkcji materiałów pierwotnych. Przyjęta metoda (alokacja masowa, ekonomiczna, podejście system expansion lub cut-off) wpływa na wynik i jego porównywalność. W wytycznych dla baterii akcentuje się potrzebę stosowania spójnych reguł recyklingu oraz transparentnego raportowania udziału materiałów wtórnych. Jest to kluczowe, ponieważ udział recyklatów w katodzie/anodzie i obudowie może stanowić jeden z najszybszych sposobów redukcji śladu węglowego produktu.

Szczegółowe zasady obliczeń dla baterii EV i przemysłowych zostały doprecyzowane przez Joint Research Centre (JRC), które przygotowało raporty metodyczne stanowiące techniczną podstawę dla aktów wdrożeniowych. W przypadku baterii przemysłowych (powyżej 2 kWh) opublikowano m.in. raport JRC141282, wskazując reguły inwentaryzacji, alokacji, jakości danych oraz raportowania wyników. Analogiczne wytyczne dla baterii EV rozwijano w ramach raportów „science for policy” i materiałów konsultacyjnych⁹.

Ważnym elementem jest definicja jednostki funkcjonalnej. W ujęciu branżowym najbardziej intuicyjna jest miara kg CO₂e/kWh pojemności baterii, natomiast podejście JRC wiąże wynik z funkcją dostarczenia energii w cyklu życia, co premiuje rozwiązania

⁸ Joint Research Centre. Calculating the carbon footprint of industrial batteries: methodological support. European Commission News, 2025.

⁹ Joint Research Centre. Carbon footprint of industrial batteries: Methodological support for the development of a Delegated Act – Final Report. JRC Publications Repository, nr JRC141282, 2025.

trwalsze i bardziej efektywne (np. o większej liczbie cykli). Jednostka funkcjonalna nie jest więc detałem technicznym: wpływa na „bodźce” rynkowe i na to, jak producenci projektują produkt oraz proces.

Greenhouse Gas Protocol (GHG Protocol) jest najbardziej rozpowszechnionym standardem raportowania emisji w ujęciu organizacyjnym i łańcuchowym. W praktyce przedsiębiorstwa często muszą „przetłumaczyć” wyniki LCA na logikę zakresów emisji (Scope 1–3): emisje bezpośrednie z procesów (Scope 1), emisje pośrednie z zakupionej energii (Scope 2) oraz emisje pozostałe w łańcuchu wartości (Scope 3). Dla baterii to właśnie Scope 3 bywa dominujący, bo obejmuje wydobycie i rafinację surowców, produkcję prekursorów, transport oraz – w zależności od granic – elementy końca życia¹⁰.

Praktycznym wyzwaniem jest spójność danych między raportowaniem produktowym (LCA/PEF) a organizacyjnym (GHG Protocol). W przedsiębiorstwach funkcjonują często równoległe „linie danych”: jedna na potrzeby LCA, druga do raportów ESG/CSRD lub sprawozdawczości korporacyjnej. Z punktu widzenia zapewnienia zgodności z wymaganiami prawnymi i normatywnymi zasadne jest wypracowanie wspólnego słownika danych, precyzyjnych definicji oraz mechanizmu wersjonowania założeń; w przeciwnym razie ryzyko niespójności narasta wraz z liczbą produktów i dostawców¹¹.

W tym miejscu pomocne jest rozróżnienie pomiędzy GHG Protocol w ujęciu korporacyjnym (Corporate Standard), a standardem produktowym, który opisuje inwentaryzację emisji w całym cyklu życia produktu (Product Life Cycle Accounting and Reporting Standard). Z perspektywy baterii, będących komponentem o bardzo istotnym wkładzie w emisje „wbudowane” produktu końcowego, rośnie znaczenie uporządkowanej wymiany danych produktowych w łańcuchu dostaw (tzw. PCF – Product Carbon Footprint). Inicjatywy takie jak PACT wprowadzają praktyczne reguły harmonizacji i wymiany PCF, które mogą zmniejszać koszty pozyskania danych od dostawców oraz ograniczać ryzyko błędów wynikających z niejednorodnych formatów. Włączenie tych mechanizmów do procesu liczenia śladu węglowego baterii, może być traktowane jako „pomost” pomiędzy rachunkowością organizacyjną (Scope 1–3), a rachunkowością produktową.

Wyzwania implementacyjne po stronie producentów

Wdrożenie wymogów rozporządzenia nie sprowadza się do jednorazowego „policzenia śladu”. To proces organizacyjny, wymagający:

- zebrania danych pierwotnych od dostawców,
- zbudowania modelu obliczeniowego zgodnego z metodyką,
- zapewnienia weryfikowalności audytowej (tzw. śladu decyzyjnego),
- przygotowania raportu,
- weryfikacji przez podmiot trzeci.

¹⁰ Greenhouse Gas Protocol. Corporate Value Chain (Scope 3) Standard. World Resources Institute and World Business Council for Sustainable Development, 2011.

¹¹ Greenhouse Gas Protocol. Product Life Cycle Accounting and Reporting Standard. WRI/WBCSD, 2011

W literaturze podkreśla się, że zdolności przedsiębiorstw są nierówne: duże organizacje inwestują w narzędzia i zespoły LCA, natomiast MŚP częściej napotykają bariery kosztowe i kompetencyjne¹².

Klasyczne oprogramowanie LCA (np. SimaPro, GaBi) oferuje dojrzałe środowiska modelowania procesów, ale wymaga zarówno inwestycji licencyjnych, jak i specjalistycznych umiejętności. Do kosztów narzędzi dochodzą koszty baz danych LCI, szkolenia zespołów, utrzymania infrastruktury oraz zewnętrznej weryfikacji. W efekcie barierą nie jest wyłącznie cena licencji, lecz całkowity koszt posiadania (TCO) oraz czas potrzebny na osiągnięcie powtarzalnej, zgodnej procedury¹³.

Rozporządzenie oraz dokumenty metodyczne akcentują jakość danych: reprezentatywność czasową, geograficzną i technologiczną, a także transparentność źródeł danych. W praktyce najtrudniejsze jest pozyskanie danych pierwotnych w łańcuchu dostaw (szczególnie dla emisji Scope 3) i utrzymanie ich aktualności. Jeśli dane są zastępowane danymi wtórnymi, rośnie ryzyko sporów interpretacyjnych i problemów w audycie.

Drugim problemem jest interoperacyjność: różne narzędzia i bazy danych mogą prowadzić do odmiennych wyników, nawet przy zbliżonych danych wejściowych. W tym sensie „porównywalność” wyników jest nie tylko wyzwaniem naukowym, ale i biznesowym – bo od niej zależy może klasa śladu węglowego oraz zdolność produktu do pozostania na rynku po wprowadzeniu progów maksymalnych. W konsekwencji, zarządzanie założeniami (np. alokacją, scenariuszami recyklingu) powinno być elementem systemu jakości, a nie doraźną decyzją analityka.

Wymóg interoperacyjności jest szczególnie widoczny w koncepcji cyfrowego paszportu produktu (DPP), w tym paszportu baterii, gdzie informacja ma być nie tylko dostępna, ale też możliwa do automatycznego przetwarzania i porównywania. W praktyce oznacza to konieczność uzgodnienia wspólnych słowników pojęć, identyfikatorów (np. dla materiałów i komponentów), formatów wymiany danych oraz reguł dostępu (różne poziomy wglądu dla konsumentów, serwisów, organów nadzoru i partnerów B2B).

W dokumentach technicznych inicjatyw branżowych wskazuje się m.in. na rolę standardów semantycznych (ontologie/RDF), interfejsów API oraz ekosystemów danych, takich jak Catena-X, jako warunku skalowalności paszportów w praktyce przemysłowej. Z perspektywy obliczeń śladu węglowego ważne jest, aby wyniki (oraz ich metadane: metoda, wersja danych, zakres, niepewność) dało się jednoznacznie osadzić w paszporcie i odtworzyć w audycie¹⁴.

¹² Rinaldi R., Righetti E., Georgiev A. Critical raw materials for batteries: Mapping the regulatory landscape and future challenges. CEPS In-depth Analysis, nr 2024-15, 2024.

¹³ Joint Research Centre. Carbon footprint of industrial batteries: Methodological support for the development of a Delegated Act – Final Report. JRC Publications Repository, nr JRC141282, 2025.

¹⁴ Rinaldi R., Righetti E., Georgiev A. Critical raw materials for batteries: Mapping the regulatory landscape and future challenges. CEPS In-depth Analysis, nr 2024-15, 2024.

Model KIMI K2 Thinking jako wsparcie obliczeń i dokumentacji

KIMI K2 to duży model językowy rozwijany przez Moonshot AI, wykorzystujący architekturę Mixture-of-Experts (MoE). W praktyce oznacza to, że model utrzymuje bardzo dużą liczbę parametrów, ale w danym zadaniu aktywuje tylko część „eksper-tów”, co pozwala łączyć wysoką jakość z relatywnie lepszą efektywnością obliczenio-wą. Dla zastosowań inżynierskich i analitycznych istotne jest też wsparcie długiego kontekstu, umożliwiające jednoczesną pracę na: fragmencie regulacji, wytycznych JRC, opisie procesu technologicznego oraz danych wejściowych¹⁵.

Wariant Thinking kładzie nacisk na rozumowanie wieloetapowe: model nie ograni-cza się do generowania odpowiedzi, lecz potrafi prowadzić użytkownika przez kolejne kroki – od definicji granic systemu i jednostki funkcjonalnej, przez kontrolę danych, po wygenerowanie kodu i przygotowanie raportu. W kontekście regulacyjnym ta cecha jest szczególnie cenna, ponieważ zgodność nie polega na „wyniku”, tylko na możliwo-sci wykazania, jak do niego doszło.

Model językowy może wspierać automatyzację obliczeń przede wszystkim poprzez generowanie i iteracyjne poprawianie skryptów (np. w Pythonie) realizujących bilanse masowe i energetyczne, obliczanie emisji na podstawie czynników emisyjnych, imple-mentację reguł alokacji oraz walidację danych. W praktyce jest to użyteczne zwłaszcza wtedy, gdy przedsiębiorstwo posiada już dane procesowe (np. z ERP/MES) i chce zmi-nimalizować ręczne przetwarzanie oraz ryzyko błędów w arkuszach kalkulacyjnych.

W typowym scenariuszu zastosowania KIMI K2 pełni rolę „asystenta analityka”: użytkownik opisuje proces produkcji (np. recepturę materiałów katodowych, zużycie energii w etapach, transport), dostarcza strukturę danych oraz wskazuje wymagania metodologiczne (PEF/JRC). Model generuje kod, a następnie, na podstawie testów i walidacji, który jest korygowany. Iteracyjny charakter prac ma wymierne znaczenie praktyczne: umożliwia szybsze wypracowanie stabilnego potoku obliczeniowego, który następnie można konsekwentnie wersjonować oraz poddawać audytowi.

Z perspektywy rygoru metodycznego zasadne jest projektowanie obliczeń jako po-wtarzalnego i odtwarzalnego potoku analitycznego, o jasno zdefiniowanych wejściach, założeniach i wynikach.

W środowisku typu Jupyter/Google Colab może to oznaczać rozdzielenie warstw:

- wczytanie i walidacja danych wejściowych (schemat, jednostki, zakresy wartości),
- modelowanie procesów i strumieni materiałowo-energetycznych,
- agregacja emisji według kategorii i etapów cyklu życia,
- generowanie raportu wraz z metadanymi (wersje danych, założenia, metoda aloka-cji).

Model LLM może przyspieszać tworzenie kodu, ale „kotwicą” wiarygodności po-winny pozostać jawne reguły walidacji (np. testy jednostkowe i testy zgodności sum kontrolnych) oraz możliwość odtworzenia wyniku na tym samym zestawie danych. Takie podejście ogranicza ryzyko, że pojedyncza pomyłka w kodzie lub jednostkach (kWh vs MJ, kg vs g) przejdzie niezauważona i trafi do deklaracji.

¹⁵ Kimi Team, Bai Y., Bao Y., Chen G. et al. Kimi K2: Open Agentic Intelligence. arXiv, nr 2507.20534, 2025.

Dodatkową korzyścią z automatyzacji jest łatwiejsze zarządzanie niepewnością i analizą wrażliwości. W praktyce audytowej często kluczowe jest pytanie: „które założenia najbardziej podnoszą końcowy wynik?”

Dotyczy to m.in. miksów energii w procesach energochłonnych, udziału materiałów wtórnych, współczynników emisji dla transportu oraz scenariuszy końca życia. Skryptowe podejście pozwala uruchamiać warianty obliczeń (scenariusze) na tym samym modelu danych, a następnie prezentować różnice w sposób porównywalny (np. wykresy tornado, przedziały ufności). W ten sposób LLM może wspierać nie tylko „policzenie” śladu, ale też przygotowanie argumentacji decyzyjnej: gdzie inwestycje w redukcję emisji dadzą największy efekt i jak to uzasadnić w dokumentacji.

Z perspektywy weryfikacji kluczowe jest, aby „wiedza” modelu nie była traktowana jako źródło faktów, lecz jako narzędzie do porządkowania danych i generowania artefaktów (kodu, tabel, raportów). Modele LLM mogą halucynować – generować informacje brzmiące wiarygodnie, lecz nieprawdziwe – dlatego w procesie zgodności powinny działać w reżimie kontroli: z ograniczeniem do dostarczonych dokumentów, z testami jednostkowymi kodu oraz z recenzją ekspercką. W praktyce oznacza to, że każdy element wniosku (np. przyjęty czynnik emisyjny, metoda alokacji) powinien dać się prześledzić do źródła¹⁶.

W praktyce oznacza to również konieczność zarządzania „śladem decyzyjnym” procesu analitycznego: przechowywania wersji promptów, fragmentów wygenerowanego kodu, zestawów danych oraz uzasadnień zmian. W podejściu inżynierskim wykorzystanie LLM powinno być organizowane podobnie jak rozwój systemów o podwyższonych wymaganiach niezawodności: z kontrolą wersji, zestawem testów regresyjnych, przeglądami zmian oraz procedurami gwarantującymi odtwarzalność wyników.

Wtedy rola modelu jest czytelna: model przyspiesza iteracje, ale ostateczna odpowiedzialność za przyjęte założenia i poprawność wyniku pozostaje po stronie zespołu. Taka praktyka jest spójna z logiką regulacji, która wymaga, aby informacje w paszporcie były dokładne, kompletne i aktualne oraz możliwe do wykazania w razie kontroli.

Istotnym argumentem na rzecz modeli typu open-weight jest możliwość wdrożenia lokalnego. W sektorze baterijnym dane procesowe i dostawcze często mają charakter wrażliwy (np. receptury, ceny, partnerzy w łańcuchu dostaw). Model uruchomiony w środowisku lokalnym – przy odpowiednio zaprojektowanej architekturze bezpieczeństwa – pozwala ograniczyć ryzyko ekspozycji danych poza organizację. Nie eliminuje to obowiązków w zakresie bezpieczeństwa informacji, ale zmienia profil ryzyka w porównaniu z modelami dostępnymi wyłącznie jako usługa (API)¹⁷.

¹⁶ International Organization for Standardization. Environmental management – Life cycle assessment – Requirements and guidelines. ISO 14044:2006, 2006.

¹⁷ Kimi Team, Bai Y., Bao Y., Chen G. et al. Kimi K2: Open Agentic Intelligence. arXiv, nr 2507.20534, 2025.

Porównanie podejścia opartego o LLM z konwencjonalnymi narzędziami

Klasyczne narzędzia LCA zapewniają dojrzałe środowiska obliczeniowe, wizualne modelowanie procesów oraz integrację z bazami danych. Ich przewagą jest przewidywalność i formalizacja – zwłaszcza w projektach wymagających powtarzalności. Ograniczeniem bywa natomiast koszt, krzywa uczenia, a także pewna „sztywność” – aktualizacja metodologii lub raportowania często wymaga zmian w modelu danych i w procedurach pracy¹⁸.

Model językowy nie zastępuje oprogramowania LCA w sensie matematycznym, ale może pełnić rolę warstwy sterującej: ułatwia generowanie kodu, automatyzuje transformacje danych, wspiera tworzenie spójnej dokumentacji i „tłumaczy” język regulacji na kroki proceduralne. W praktyce najlepiej sprawdza się jako element hybrydowego workflow: obliczenia i bazy danych mogą pozostać w sprawdzonym środowisku, natomiast LLM wspiera integrację, raportowanie i kontrolę jakości¹⁹.

W branży bateryjnej rozwijane są także dedykowane kalkulatory, np. w ekosystemie Global Battery Alliance (GBA), które oferują ustrukturyzowane formularze danych i ścieżki obliczeń zgodne z regułami branżowymi. Dla organizacji bez silnego zespołu LCA jest to atrakcyjny punkt startu. Z drugiej strony, w niestandardowych konfiguracjach (nietyпова chemia, integracje IT, automatyczne pobieranie danych) elastyczność narzędzi kalkulatorowych może być ograniczona²⁰.

Na rynku dostępne są także inne modele językowe o wysokich kompetencjach w generowaniu kodu i analizie dokumentów (np. GPT-4, Claude, Gemini). Wybór modelu do zastosowań regulacyjnych powinien uwzględniać nie tylko jakość odpowiedzi, ale też:

- możliwość kontroli środowiska (wdrożenie lokalne vs API),
- politykę danych, deterministyczność (powtarzalność),
- a także dostępność mechanizmów audytu i wersjonowania.

W wielu organizacjach kluczowym czynnikiem będzie to, czy rozwiązanie można włączyć w istniejący system zarządzania jakością i bezpieczeństwem informacji²¹.

W kontekście wymogów regulacyjnych, kryteria doboru modelu powinny obejmować nie tylko „jakość odpowiedzi”, lecz także kwestie wdrożeniowe: możliwość pracy na danych poufnych (lokalnie lub w środowisku o kontrolowanych uprawnieniach), przewidywalność zachowania modelu, możliwość audytu procesu (logowanie, odtwarzalność) oraz łatwość integracji z narzędziami LCA i repozytoriami danych²².

W praktyce przemysłowej często najbardziej efektywne okazuje się podejście hybrydowe: obliczenia rdzeniowe realizowane są przez zweryfikowany kod i bazy danych,

¹⁸ Vaghela J.R., Valaki J.B., Joshi H.I., Thanki S.J., Pandey A.B. Comparative Analysis on Sustainability Parameters of Traditional Tool Manufacturing Processes Using Life Cycle Analysis Tools. *Journal of Engineering Science and Technology Review*, nr 2(17), s. 23-34, 2024.

¹⁹ PRé Sustainability. SimaPro Tutorial. PRé Sustainability, 2023.

²⁰ Global Battery Alliance, CEPS, RECHARGE. One Year Until the EU Battery Passport – Multi-stakeholder roundtable report. Global Battery Alliance, 2026.

²¹ GreenDelta. openLCA 2 Manual. GreenDelta, 2023.

²² Ciroth A. ICT for environment in life cycle applications openLCA – A new open source software for life cycle assessment. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, nr 4(12), s. 209-210, DOI: 10.1065/lca2007.06.337, 2007.

natomiast model językowy wspiera przygotowanie dokumentacji, mapowanie źródeł danych, generowanie raportów i weryfikację spójności (np. wykrywanie braków w metadanych). Tak skonstruowany workflow minimalizuje ryzyko błędów i jednocześnie wykorzystuje największą przewagę LLM – szybkość pracy na tekście i strukturach danych.

Należy podkreślić, że przedstawione rozważania mają charakter metodyczny i koncepcyjno-wdrożeniowy, a zakres pracy nie obejmuje pełnej walidacji na kompletnym, przemysłowym zbiorze danych obejmującym cały łańcuch wartości baterii. Dokładność i porównywalność wyników pozostają wprost zależne od jakości danych wejściowych, przyjętych granic systemu oraz jawnie zdefiniowanych założeń modelowych (m.in. w obszarze alokacji i scenariuszy końca życia).

W konsekwencji proponowane podejście powinno być traktowane jako rama organizacji procesu obliczeń i dokumentowania, a nie jako uniwersalny „przepis” gwarantujący zgodność bez uwzględnienia kontekstu konkretnego przedsiębiorstwa. Wykorzystanie modeli LLM, w tym KIMI K2 Thinking, nie zastępuje oceny eksperckiej ani nie eliminuje konieczności niezależnej weryfikacji obliczeń; może natomiast zwiększać efektywność pracy i ograniczać koszty przygotowania artefaktów.

Szczególną uwagę należy poświęcić ryzyku generowania odpowiedzi pozornie poprawnych, lecz niezgodnych z danymi lub standardami — dlatego kluczowe są testy, kontrola wersji oraz recenzja zmian. Dodatkowym ograniczeniem jest zmienność narzędzi i środowisk (modele, wersje, biblioteki), która wymaga dyscypliny w dokumentowaniu i utrzymaniu pipeline’u. Wreszcie, w praktyce wdrożeniowej istotne mogą być czynniki organizacyjne (dostęp do danych, współpraca z dostawcami, procedury audytu), które wykraczają poza czysto techniczny opis metody.

Podsumowanie

Rozporządzenie (UE) 2023/1542 oraz koncepcja Paszportu Baterii UE wprowadzają jakościową zmianę: ślad węglowy przestaje być „opcjonalnym” elementem raportowania, a staje się parametrem regulacyjnym, który – w kolejnych etapach – może decydować o dopuszczeniu produktu do rynku. Zmiana ta wymusza profesjonalizację obliczeń LCA/PEF, rozwój kompetencji w obszarze danych i audytu oraz budowę powtarzalnych procesów obliczeniowo-raportowych.

Modele językowe – na przykładzie KIMI K2 Thinking – mogą stać się użytecznym elementem tego ekosystemu, pod warunkiem właściwego zaprojektowania roli: jako narzędzia wspierającego automatyzację, integrację danych, generowanie kodu i dokumentacji, a nie jako autonomicznego „źródła prawdy”.

Dobłą praktyką jest podejście hybrydowe: LLM wspiera inżynierię danych i raportowanie, natomiast krytyczne decyzje metodyczne i walidacja, pozostają po stronie ekspertów oraz formalnych procedur jakości.

W perspektywie rozwoju można wskazać trzy kierunki:

- tworzenie kontrolowanych „agentów” do cyklicznego przeliczania śladu węglowego na podstawie zmian w danych procesowych,
- integrację z grafami wiedzy łańcucha dostaw (śledzenie materiałów i dostawców),

- standaryzację formatów danych paszportu, co ułatwi interoperacyjność i ograniczy koszty zgodności.

W każdym z tych kierunków kluczowe będzie utrzymanie przejrzystości założeń oraz wersjonowanie danych i modelu obliczeniowego.

Warto jednak wskazać ograniczenia podejścia opartego na LLM:

- po pierwsze, modele językowe mogą generować treści pozornie poprawne, ale niespójne z założeniami metodycznymi (np. błędne granice systemu, nieuprawnione uogólnienia współczynników emisji),
- po drugie, w kontekście zgodności regulacyjnej istotne jest zarządzanie wersjami: zmiana modelu, biblioteki obliczeniowej lub bazy danych LCI może prowadzić do zmian wyniku, które należy umieć wyjaśnić i udokumentować,
- po trzecie, pojawia się kwestia odpowiedzialności: LLM nie jest stroną audytu i nie „bierze” odpowiedzialności za deklarację – odpowiedzialność pozostaje po stronie operatora procesu obliczeń.

Z tego powodu kluczowe są procedury kontroli jakości: przegląd ekspercki, walidacja na przypadkach referencyjnych oraz porównania z wynikami uzyskanymi w uznanych narzędziach LCA.

Z perspektywy wdrożeń branżowych istotna jest również standaryzacja wymiany danych produktowych. W miarę jak paszporty baterii stają się elementem szerszej infrastruktury cyfrowych paszportów produktu, rośnie znaczenie wspólnych formatów i minimalnych zestawów danych, które umożliwią automatyczną weryfikację i porównywanie deklaracji w łańcuchach wartości. Dokumenty techniczne opracowywane w ramach inicjatyw branżowych wskazują na potrzebę łączenia warstwy semantycznej (znaczenie danych) z warstwą techniczną (sposób udostępniania i kontroli dostępu). W praktyce oznacza to, że kompetencje analityczne (LCA/CF) muszą iść w parze z kompetencjami „data governance”, aby wynik obliczeń mógł być wiarygodnie przeniesiony do paszportu i utrzymany w czasie.

W ujęciu badawczym interesującym kierunkiem jest opracowanie otwartych, dobrze opisanych zestawów danych testowych dla baterii, które pozwolą porównywać implementacje obliczeń między zespołami i narzędziami. Takie „benchmarki” – analogicznie do benchmarków w informatyce – mogłyby obejmować zarówno dane materiałowe i energetyczne, jak i scenariusze końca życia, umożliwiając walidację algorytmów oraz ocenę wrażliwości na założenia. Ułatwiłoby to również dydaktyczne wykorzystanie podejścia (np. w laboratoriach z LCA/ESG), bez ujawniania danych wrażliwych firm.

Bibliografia

- Battery Pass. Battery Passport Technical Guidance. Battery Pass Consortium, 2024.
- Ciroth A. ICT for environment in life cycle applications openLCA – A new open source software for life cycle assessment. The International Journal of Life Cycle Assessment, nr 4(12), s. 209-210, DOI: 10.1065/lca2007.06.337, 2007.
- Ellingsen L.A.-W., Majeau-Bettez G., Singh B., Srivastava A.K., Valøen L.O., Strømman A.H. Life Cycle Assessment of a Lithium-Ion Battery Vehicle Pack. Journal of Industrial Ecology, nr 1(18), s. 113-124, DOI: 10.1111/jiec.12072, 2014.

- European Commission. Annexes to the Proposal for a Regulation of the European Parliament and of the Council concerning batteries and waste batteries. COM (2020) 798 final, 2020.
- European Environment Agency. Electric vehicles from life cycle and circular economy perspectives. EEA Report, nr 13/2018, 2018.
- Global Battery Alliance, CEPS, RECHARGE. One Year Until the EU Battery Passport – Multi-stakeholder roundtable report. Global Battery Alliance, 2026.
- GreenDelta. openLCA 2 Manual. GreenDelta, 2023.
- Greenhouse Gas Protocol. Corporate Value Chain (Scope 3) Standard. World Resources Institute and World Business Council for Sustainable Development, 2011.
- Greenhouse Gas Protocol. Product Life Cycle Accounting and Reporting Standard. WRI/WBCSD, 2011
- International Organization for Standardization. Environmental management – Life cycle assessment – Requirements and guidelines. ISO 14044:2006, 2006.
- Joint Research Centre. Calculating the carbon footprint of industrial batteries: methodological support. European Commission News, 2025.
- Joint Research Centre. Carbon footprint of industrial batteries: Methodological support for the development of a Delegated Act – Final Report. JRC Publications Repository, nr JRC141282, 2025.
- Kimi Team, Bai Y., Bao Y., Chen G. et al. Kimi K2: Open Agentic Intelligence. arXiv, nr 2507.20534, 2025.
- PRé Sustainability. SimaPro Tutorial. PRé Sustainability, 2023.
- Rinaldi R., Righetti E., Georgiev A. Critical raw materials for batteries: Mapping the regulatory landscape and future challenges. CEPS In-depth Analysis, nr 2024-15, 2024.
- Rozporządzenie Parlamentu Europejskiego i Rady (UE) 2023/1542 z dnia 12 lipca 2023 r. w sprawie baterii i zużytych baterii, zmieniające dyrektywę 2008/98/WE i rozporządzenie (UE) 2019/1020 oraz uchylające dyrektywę 2006/66/WE, EUR-Lex, nr L 191, s. 1-117, 2023.
- Vaghela J.R., Valaki J.B., Joshi H.I., Thanki S.J., Pandey A.B. Comparative Analysis on Sustainability Parameters of Traditional Tool Manufacturing Processes Using Life Cycle Analysis Tools. Journal of Engineering Science and Technology Review, nr 2(17), s. 23-34, 2024.

Adres do korespondencji: j.gajda@urk.edu.pl

ORCID: Jakub St. Gajda 0009-0001-5736-0598

ORCID: Krzysztof Molenda 0000-0002-1019-7519

ORCID: Karolina Furyk-Grabowska 0000-0001-7509-1814

ORCID: Marcin Mirski 0009-0005-3054-9429

UWARUNKOWANIA EFEKTYWNOŚCI WDRAŻANIA AUTOMATYCZNYCH SYSTEMÓW DOJU

Marek Gaworski¹

¹ Katedra Inżynierii Produkcji, Instytut Inżynierii Mechanicznej, Szkoła Główna
Gospodarstwa Wiejskiego w Warszawie

Wprowadzenie

Rosnące zapotrzebowanie na surowce roślinne i zwierzęce implikuje wdrażanie coraz nowocześniejszych metod ich produkcji. Metody produkcji w systemie gospodarki żywnościowej są nośnikiem różnych form postępu. Globalny postęp w rolnictwie stanowi wynik systematycznych poszukiwań racjonalnych rozwiązań służących podnoszeniu ogólnego poziomu efektywności zrównoważonej produkcji rolniczej. Postęp w rolnictwie, ukierunkowany na podnoszenie efektywności produkcji, identyfikuje się tym samym z ustawicznym doskonaleniem obiektów w przestrzeni rolniczej¹. W przestrzeni gospodarstw rolnych doskonaleniu podlega sprzęt użytkowany na polach i w pomieszczeniach inwentarskich, którego konstrukcja jest coraz bardziej wyrafinowana i funkcjonalna, a to dzięki postępowi technicznemu i konstrukcyjnemu. W efekcie wprowadzania do praktyki coraz doskonalszych rozwiązań konstrukcyjnych stopniowo modyfikujących technologie produkcji roślinnej i zwierzęcej tworzone są przesłanki do kreowania postępu technologicznego. Za jedną z miar tego postępu przyjmowany jest stopień substytucji pracy zwierząt i ludzi pracą maszyn i innych urządzeń technicznych. Substytucja pracy ludzkiej w rolnictwie prowadzi od mechanizacji do stopniowej automatyzacji procesów i w efekcie do zmian wzajemnego udziału nakładów pracy człowieka i urządzeń technicznych².

Szczególnym przykładem wdrażania automatyzacji procesu obsługi zwierząt w gospodarstwach jest obszar mechanicznego doju, uwzględniający użytkowanie robotów udojowych. Automatyczne systemy doju od ponad trzydziestu lat stanowią wyposażenie coraz większej liczby gospodarstw mlecznych w wielu krajach na świecie. Roboty automatyzujące dój są odpowiedzią na rosnące problemy z dostępnością siły roboczej i równocześnie potrzeby związane z ograniczeniem uciążliwości pozyskiwania mleka w gospodarstwach³. Z drugiej strony, zainstalowanie robota lub zestawu robotów udojowych w gospodarstwie generuje relatywnie wysokie nakłady finansowe, co nie pozostaje bez wpływu na ocenę zasadności inwestycji w nowoczesne wyposażenie produkcji

¹ Michałek R, Kowalski J. Technical progress in agriculture. *Annual Review of Agricultural Engineering*, 2(1), 67-80, 2000.

² Priekulis J, Laurs A. Development trends of milk production mechanisation in Latvia. In: *Proceedings of the Conference on Engineering for Rural Development*, vol. 19, pp. 270-275, 2020.

³ Filho LMS, Lopes MA, Brito SC, Rossi G, Conti L, Barbari M. Robotic milking of dairy cows: A review. *Seminars in Agricultural Sciences*, 41(6), 2833-2849. doi: 10.5433/1679-0359.2020v41n6p2833, 2020.

mleczarskiej. Kluczem do ekonomicznych rozważań związanych z automatyzacją doju krów są różne kwestie oceny opłacalności użytkowania specjalistycznego sprzętu w gospodarstwie. Opłacalność pozostaje w związku z efektywnością wdrażania automatycznych systemów doju w rzeczywistych warunkach prowadzenia produkcji mleczarskiej⁴. Te rzeczywiste warunki mogą różnić się między regionami i krajami, co stanowi przesłankę do rozwinięcia szczegółowego studium badawczego.

Podejście do oceny opłacalności użytkowania robota udojowego w gospodarstwie

Opłacalność użytkowania robota udojowego w gospodarstwie jest kształtowana przez wiele czynników, w tym makroekonomicznych (obejmujących przychody ze sprzedaży mleka wynikające z jego ceny w skupie), technologicznych (uwzględniających zużycie, a stąd koszty energii, wody i środków chemicznych) i technicznych (związanych z kosztami serwisu instalacji roboczej). W praktyce, co potwierdzają wyniki studiów badawczych prezentowanych w literaturze, istotna w ocenie opłacalności użytkowania robota udojowego jest również ilość mleka wydojonego przez robot udojowy w ciągu roku. Wyniki studiów badawczych wskazują, że opłacalność użytkowania jednostanowiskowego robota udojowego osiąga się w przypadku pozyskania 515 tys. kg,⁵ a według innych autorów nawet 800 tys. kg mleka rocznie⁶.

Robot udojowy z jednym stanowiskiem jest w praktyce na ogół użytkowany w stadzie o pogłowie od 50 do 65 krów mlecznych^{7,8}. Na podstawie tych danych można obliczyć, jaka powinna być roczna wydajność mleczna jednej krowy, aby spełnić wymagania związane z opłacalnością użytkowania jednostanowiskowego robota udojowego w gospodarstwie. W obliczeniu wymagane jest założenie, że krowy w stadzie podlegają rotacji związanej z zasuszaniem i wycieleniami, dlatego pogłowie krów w stadzie obsługiwanych przez robot udojowy na ogół zwiększa się o 15%.

W obliczeniu zakresu rocznej wydajności mlecznej krów w oborze z jednostanowiskowym robotem udojowym uwzględniono dane zestawione w tabeli 1, zaczerpnięte z przedstawionych studiów badawczych.

⁴ Hansen BG, Herje HO, Höva J. Profitability on dairy farms with automatic milking systems compared to farms with conventional milking systems. *International Food and Agribusiness Management Review*, 22(2), 215-228. doi: 10.22434/IFAMR2018.0028, 2019.

⁵ Meskens L, Vandermersch M, Mathijs E. Implication of the introduction of automatic milking on dairy farms. Literature review on the determinants and implications of technology adoption. Internal report. Catholic University, Leuven, Belgium, 2001.

⁶ Heikkilä AM, Vanninen L, Manninen E. Economics of small-scale dairy farms having robotic milking. The First North American Conference on Precision Dairy Management, Toronto, Canada, 2010.

⁷ Castro A, Pereira JM, Amiana C, Bueno J. Estimating efficiency in automatic milking systems. *Journal of Dairy Science*, 95(2), 929-936. doi: 10.3168/jds.2010-3912, 2012.

⁸ Tremblay M, Hess JP, Christenson BM, McIntyre KK, Smink B, van der Kamp AJ, de Jong LG, Dopfer D. Factors associated with increased milk production for automatic milking systems. *Journal of Dairy Science*, 99(5), 3824-3837. doi: 10.3168/jds.2015-10152, 2016.

Tabela 1. Dane do obliczeń i obliczenia rocznej wydajności mlecznej krów w oborze z jednostanowiskowym robotem udojowym

Poz.	Parametr	Dane obliczeniowe	
1.	Roczna ilość mleka do pozyskania (kg/robot/rok)	515 000	800 000
2.	Pogłowie krów w dojonym stadzie (-)	50	65
3.	Pogłowie krów w gospodarstwie (krowy dojone +15%) (-)	57,5 (ok. 58)	74,75 (ok. 75)
4.	Wydajność mleczna krów (kg/krowa/rok) (poz. 1 / poz. 3)	8 957	10 702

W szczegółowych obliczeniach przyjęto założenie, że robot udojowy z niższą wymaganą roczną wydajnością mleczną obsługuje stado z minimalnym pogłowiem (50 krów), zaś robot z wyższą wymaganą roczną wydajnością mleczną obsługuje stado krów liczące 65 sztuk.

Sugerowana wydajność mleczna krów w oborze z jednostanowiskowym robotem udojowym, jak wynika z obliczeń w tabeli 1, powinna kształtować się w zakresie od ok. 8 960 kg do ok. 10 700 kg mleka na krowę rocznie.

Ustalenie zakresu rocznej wydajności mlecznej krów może zostać również oparte na innym podejściu. Jest to podejście wynikające z dostępu do odpowiednich danych statystycznych. Takie dane, obejmujące wydajność mleczną krów w geograficznych regionach świata w 2024 roku, zestawiono w tabeli 2.

Tabela 2. Wydajność mleczna krów w regionach geograficznych w 2024 r.

Region geograficzny	Wydajność mleczna krów (kg/krowa/rok)
Afryka	606
Azja	2 087
Ameryka Południowa	2 595
Oceania	5 048
Australia i Nowa Zelandia	5 094
Europa	7 188
Ameryka Północna	10 904
Świat	2 707

Źródło: opracowanie własne na podstawie⁹

Dane kontynentalne w tabeli 2 zestawiono w kolejności rosnącej wydajności mlecznej krów. Można zauważyć, że różnica między najmniejszą a największą wydajnością wynosi ok. 10 300 kg mleka na krowę rocznie. Zakres ten został podzielony na pięć

⁹ <https://www.fao.org/faostat/>

równych przedziałów (kategorii). Zakresy wartości i średnie dla wyróżnionych kategorii wydajności mlecznej krów KI-KV zostały zestawione w tabeli 3.

Tabela 3. Kategorie wydajności mlecznej krów (kg/krowa/rok)

Kategoria	KI	KII	KIII	KIV	KV
Zakres	601-2660	2661-4720	4721-6780	6781-8840	8841-10900
Średnia	1630	3690	5750	7810	9870

Najwyższa kategoria wydajności mlecznej krów (KV) obejmuje zakres od 8841 do 10900 kg mleka na krowę rocznie. Zakres ten jest zbliżony pod względem rzędu wielkości do obliczonych wydajności krów (8957–10702 kg/krowa/rok) wynikających z analizy opłacalności użytkowania jednostanowiskowego robota udojowego.

Uwzględniając zakresy wydajności mlecznej dla poszczególnych kategorii KI-KV, można podjąć kwestię, w których krajach uzyskano już poziom wydajności mlecznej krów w najwyższej kategorii KV. Tym samym jest to pytanie, w których krajach osiągnięto zbieżność najwyższego poziomu postępu technicznego, czyli najwyższej generacji doju reprezentowanej przez roboty udojowe, z najwyższym poziomem postępu biologicznego, reprezentowanego przez wydajność mleczną krów (identyfikowaną kategorią KV). Odpowiedź w zakresie tej kwestii stanowi treść wyników analiz na bazie grupy krajów europejskich, która została poszerzona o dodatkowe porównania i dyskusję.

Porównanie kategorii wydajności mlecznej krów na przykładzie krajów UE

Ocenę warunków równoczesnego wdrażania dwóch form postępu w obszarze produkcji mleczarskiej przeprowadzono na przykładzie danych pochodzących z krajów Unii Europejskiej. W tabeli 4 zestawiono wydajność mleczną krów z przyporządkowaniem do odpowiedniej kategorii wydajności KI-KV. Dane do tego zestawienia zostały zaczerpnięte z oficjalnych źródeł statystycznych, publikowanych w wersji internetowej przez FAO. W drugiej połowie kwietnia 2026 roku na stronie www.fao.org/faostat/ były dostępne dane statystyczne produkcji rolniczej na świecie, które obejmowały okres do 2024 roku. Stąd do zestawienia w tabeli 4 wykorzystano dane dotyczące rocznej wydajności mlecznej krów pochodzące z ostatniego dostępnego roku, tj. 2024.

Dane w tabeli 4 pokazują, że w dziesięciu krajach Unii Europejskiej osiągnięto już poziom średniej rocznej wydajności mlecznej krów, który mieści się w najwyższej kategorii KV. W krajach tych można wskazać na zbieżność postępu technicznego i biologicznego w przypadku produkcji mleka w gospodarstwach użytkujących roboty udojowe. Postęp techniczny w obszarze doju krów, identyfikowany poprzez wyposażenie gospodarstw w automatyczne systemy doju, może być w pełni wykorzystany w efekcie obsługi stad krów mlecznych zaliczonych do najwyższej kategorii wydajności mlecznej, reprezentującej postęp biologiczny. Wśród krajów o najwyższej wydajności mlecznej krów w kategorii KV dominują kraje położone w strefie Morza Bałtyckiego.

Tabela 4. Wydajności mleczne krów (kg/krowa/rok) w krajach Unii Europejskiej i ich klasyfikacja na podstawie kategorii wydajności KI-KV, w oparciu o dane z 2024 r.

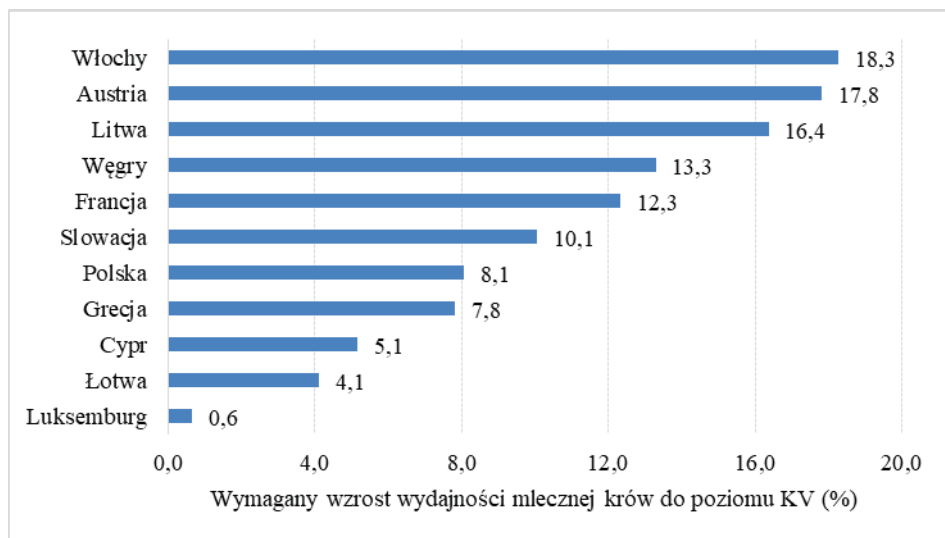
Kategorie rocznej wydajności mlecznej krów	Kraj	Wydajność mleczna (kg/krowa/rok)	Zakresy odniesienia (kg/krowa/rok)
KI			601-2660
KII	Rumunia	3540	2661-4720
	Bułgaria	3735	
KIII	Irlandia	5880	4721-6780
	Malta	6557	
	Chorwacja	6592	
	Słowenia	6621	
KIV	Włochy	7475	6781-8840
	Austria	7504	
	Litwa	7598	
	Węgry	7804	
	Francja	7871	
	Słowacja	8033	
	Polska	8182	
	Grecja	8201	
	Cypr	8408	
	Łotwa	8491	
	Luksemburg	8784	
KV	Belgia	8868	8841-10900+
	Portugalia	9102	
	Holandia	9396	
	Niemcy	9410	
	Finlandia	9675	
	Szwecja	9693	
	Hiszpania	9788	
	Czechy	9871	
	Dania	10483	
	Estonia	11353	

Źródło: opracowanie własne na podstawie¹⁰

W czwartej kategorii wydajności mlecznej krów (KIV) znalazło się jedenaście krajów, a więc niewiele więcej niż w przypadku kategorii KV (tabela 4). Ta kategoria wydajności mlecznej bezpośrednio poprzedza najwyższą kategorię KV, istotną dla osiągnięcia efektywnego wykorzystania potencjału robotów udojowych. Kraje z wydajnością mleczną w kategorii KIV są najbliższe osiągnięciu poziomu wydajności mlecznej, uzasadniającego użytkowanie robotów udojowych w gospodarstwach. Można obliczyć, ile kilogramów wydajności mlecznej brakuje w przypadku każdego z krajów w kategorii KIV do tego, by osiągnąć graniczną wartość wydajności mlecznej dla kate-

¹⁰ <https://www.fao.org/faostat/>

gorii KV. Tego typu problem można jednak sformułować inaczej. Można obliczyć, o ile procent powinna wzrosnąć wydajność mleczna krów w stosunku do dotychczasowego poziomu wydajności, aby osiągnąć minimalną granicę dla kategorii KV. Wyniki tego obliczenia zostały przedstawione na rysunku 1.



Rysunek 1. Zestawienie wzrostu dotychczasowej (w 2024 roku) rocznej wydajności mlecznej krów, wymaganego do osiągnięcia dolnej granicy wydajności mlecznej w kategorii KV

Przedstawione na rysunku 1 wyniki obliczeń bazują na danych z 2024 roku, dlatego można z dużym prawdopodobieństwem wskazać, że niektóre spośród analizowanych krajów mogły już osiągnąć poziom rocznej wydajności mlecznej krów zaliczanej do kategorii KV. Generalnie mleczność krów wykazuje tendencję wzrostową każdego roku. W związku z tym liczba krajów w wyróżnionych kategoriach mleczności może się zmieniać, podobnie jak dystans, jaki poszczególne kraje muszą pokonać, aby osiągnąć maksymalną wydajność w danej kategorii.

Niezależnie od wyników porównania, podjęte badanie inspiruje do dalszej dyskusji na temat różnych aspektów doskonalenia produkcji mleczarskiej na poziomie gospodarstw. Ocenę produkcji mleczarskiej i jej poprawę w gospodarstwie można rozważyć w obszarze wydajności mlecznej krów i czynników, które o niej decydują. Wydajność mleczna krów reprezentuje ich potencjał biologiczny, analizowany w niniejszym badaniu w powiązaniu z potencjałem technicznym urządzeń do dojenia. W praktyce potencjał techniczny dotyczy nie tylko automatycznych systemów doju, ale także innych systemów doju. W szczegółowych badaniach¹¹ porównano produkcję i inne wskaźniki

¹¹ Gaworski M, Leola A, Kiiman H, Sada O, Kic P, Priekulis J. Assessment of dairy cow herd indices associated with different milking systems. *Agronomy Research* 16(1), 83-93. DOI: 10.15159/AR.17.075, 2018.

(w tym aspekty zdrowotne) stad krów mlecznych dojonych systemami dojarek przewodowych, w halach udojowych oraz przy użyciu robotów udojowych (AMS). Wydajność mleczna krów w gospodarstwach wyposażonych w AMS była o około 24% wyższa w porównaniu z wydajnością mleczną krów w gospodarstwach z dojkami przewodowymi. Podobne zależności między produktywnością stada krów mlecznych a rodzajem systemu doju wskazały badania,¹² w których porównano zastosowanie robotów udojowych i hal udojowych (typu auto-tandem) w gospodarstwach mlecznych.

Efektywność użytkowania automatycznych systemów doju w gospodarstwach rolnych jest również uwarunkowana innymi czynnikami, w tym działaniem systemu zarządzania stadem krów¹³. Dlatego potencjał produkcyjny stada krów mlecznych rozpatrywany w niniejszym badaniu, który uzasadnia wdrożenie robota dojnego w gospodarstwie, powinien być rozwijany poprzez badania czynników sprzyjających i zakłócających pełne wykorzystanie potencjału technicznego robota udojowego. Są to badania związane z oceną dokładności pracy robota udojowego,¹⁴ jakości mleka,¹⁵ stosowania robotów udojowych na pastwisku,¹⁶ jak również zdrowia i dobrostanu krów mlecznych dojonych przez robota,¹⁷ co może wpływać na wydajność mleczną krów.

Oprócz wydajności mlecznej krów kluczowym czynnikiem zapewniającym odpowiedni potencjał produkcyjny stada dojonego robotem jest pogłowie krów. W niniejszych badaniach liczebność stada krów mlecznych została uwzględniona w pierwszym etapie rozważań dotyczących określenia zakresu wydajności mlecznej krów w stadzie dojonym automatycznym systemem doju. Drugi etap rozważań opracowano na podstawie danych dotyczących wydajności mlecznej krów w grupie 27 krajów Unii Europejskiej. Każdy kraj wyróżnia się średnią wielkością stad krów mlecznych w gospodarstwach oraz udziałem stad pod względem liczebności krów. Ten aspekt analizy, podejmowany już we wcześniejszych badaniach porównawczych,¹⁸ może stanowić kierunek dalszych badań rozwijanych w analizach wdrażania różnych form postępu w produkcji mlecznej w gospodarstwach rolnych.

¹² Gyax L, Neuffer I, Kaufmann C, Hauser R, Wechsler B. Comparison of functional aspects in two automatic milking systems and auto-tandem milking parlors. *Journal of Dairy Science* 90(9), 4265-4274. doi: 10.3168/jds.2007-0126, 2007.

¹³ Bach A, Devant M, Iglesias C, Ferrer A. Forced traffic in automatic milking systems effectively reduces the need to get cows, but alters eating behavior and does not improve milk yield of dairy cattle. *Journal of Dairy Science* 92(3), 1272-1280. doi: 10.3168/jds.2008-1443, 2009.

¹⁴ Bach A, Busto I. Effects on milk yield of milking interval regularity and teat cup attachment failures with robotic milking systems. *Journal of Dairy Research*, 72(1), 101-106. doi: 10.1017/s0022029904000585, 2005.

¹⁵ Hogenboom JA, Pellegrino L, Sandrucci A, Rosi V, D'Incecco P. Invited review: Hygienic quality, composition, and technological performance of raw milk obtained by robotic milking of cows. *Journal of Dairy Science* 102(9), 7640-7654. doi: 10.3168/jds.2018-16013, 2019.

¹⁶ Lessire F, Moula N, Hornick J, Dufrasne I. Systematic review and meta-analysis: Identification of factors influencing milking frequency of cows in automatic milking systems combined with grazing. *Animals* 10(5), 913, 1-21. doi: 10.3390/ani10050913, 2020.

¹⁷ Jacobs JA, Siegford JM. Invited review: The impact of automatic milking systems on dairy cow management, behavior, health, and welfare. *Journal of Dairy Science* 95(5), 2227-2247. doi: 10.3168/jds.2011-4943, 2012.

¹⁸ Leola A, Priekulis J, Česna J, Gaworski M. Trend of cow herd size in Baltic states. *Agromony Research* 19(S2), 1052-1059. doi: 10.15159/AR.21.020, 2021.

Podsumowanie

Wdrażanie postępu technicznego w rolnictwie może generować wysokie koszty, które w przypadku jednostanowiskowych robotów udojowych przekraczają zazwyczaj 120 000 euro. Dlatego tak ważne jest pełne wykorzystanie potencjału wyrafinowanego sprzętu technicznego, jakim są roboty udojowe. Sprzyja temu zrównoważone podejście do łączenia postępu technicznego z postępem biologicznym i innymi formami postępu, które są elementem doskonalenia procesów produkcyjnych w rolnictwie.

Przedstawione wyniki studium badawczego wskazały różnice w warunkach wdrażania automatycznych systemów doju w wyróżnionych regionach Europy. W 2024 roku w dziesięciu krajach Unii Europejskiej osiągnięto średnią wydajność mleczną krów sprzyjającą spełnieniu kryterium pełnego wykorzystania potencjału robotów udojowych. Zwiększanie wydajności mlecznej krów jest procesem ciągłym i w efekcie w coraz większej liczbie krajów tworzone są warunki do efektywnego wdrażania postępu technicznego w zakresie doju krów.

Bibliografia

- Bach A, Busto I. Effects on milk yield of milking interval regularity and teat cup attachment failures with robotic milking systems. *Journal of Dairy Research*, 72(1), 101-106. DOI: 10.1017/s0022029904000585, 2005.
- Bach A, Devant M, Iglesias C, Ferrer A. Forced traffic in automatic milking systems effectively reduces the need to get cows, but alters eating behavior and does not improve milk yield of dairy cattle. *Journal of Dairy Science* 92(3), 1272-1280. DOI: 10.3168/jds.2008-1443, 2009.
- Castro A, Pereira JM, Amiana C, Bueno J. Estimating efficiency in automatic milking systems. *Journal of Dairy Science*, 95(2), 929-936. DOI: 10.3168/jds.2010-3912, 2012.
- FAO statistical data; <https://www.fao.org/faostat/>
- Filho LMS, Lopes MA, Brito SC, Rossi G, Conti L, Barbari M. Robotic milking of dairy cows: A review. *Semina: Ciências Agrárias*, 41(6), 2833-2849. DOI: 10.5433/1679-0359.2020v41n6p2833, 2020.
- Gaworski M, Leola A, Kiiman H, Sada O, Kic P, Priekulis J. Assessment of dairy cow herd indices associated with different milking systems. *Agronomy Research* 16(1), 83-93. DOI: 10.15159/AR.17.075, 2018.
- Gygax L, Neuffer I, Kaufmann C, Hauser R, Wechsler B. Comparison of functional aspects in two automatic milking systems and auto-tandem milking parlors. *Journal of Dairy Science* 90(9), 4265-4274. DOI: 10.3168/jds.2007-0126, 2007.
- Hansen BG, Herje HO, Höva J. Profitability on dairy farms with automatic milking systems compared to farms with conventional milking systems. *International Food and Agribusiness Management Review*, 22(2), 215-228. DOI: 10.22434/IFAMR2018.0028, 2019.
- Heikkilä AM, Vanninen L, Manninen E. Economics of small-scale dairy farms having robotic milking. *The First North American Conference on Precision Dairy Management*, Toronto, Canada, 2010.
- Hogenboom JA, Pellegrino L, Sandrucci A, Rosi V, D'Incecco P. Invited review: Hygienic quality, composition, and technological performance of raw milk obtained by robotic milking of cows. *Journal of Dairy Science* 102(9), 7640-7654. DOI: 10.3168/jds.2018-16013, 2019.

- Jacobs JA, Siegford JM. Invited review: The impact of automatic milking systems on dairy cow management, behavior, health, and welfare. *Journal of Dairy Science* 95(5), 2227-2247. DOI: 10.3168/jds.2011-4943, 2012.
- Leola A, Priekulis J, Česna J, Gaworski M. Trend of cow herd size in Baltic states. *Agronomy Research* 19(S2), 1052-1059. DOI: 10.15159/AR.21.020, 2021.
- Lessire F, Moula N, Hornick J, Dufrasne I. Systematic review and meta-analysis: Identification of factors influencing milking frequency of cows in automatic milking systems combined with grazing. *Animals* 10(5), 913, 1-21. DOI: 10.3390/ani10050913, 2020.
- Meskens L, Vandermeresch M, Mathijs E. Implication of the introduction of automatic milking on dairy farms. Literature review on the determinants and implications of technology adoption. Internal report. Catholic University, Leuven, Belgium, 2001.
- Michałek R, Kowalski J. Technical progress in agriculture. *Annual Review of Agricultural Engineering*, 2(1), 67-80, 2000.
- Priekulis J, Laurs A. Development trends of milk production mechanisation in Latvia. In: *Proceedings of the Conference on Engineering for Rural Development*, vol. 19, pp. 270-275, 2020.
- Tremblay M, Hess JP, Christenson BM, McIntyre KK, Smink B, van der Kamp AJ, de Jong LG, Dopfer D. Factors associated with increased milk production for automatic milking systems. *Journal of Dairy Science*, 99(5), 3824-3837. DOI: 10.3168/jds.2015-10152, 2016.

Adres do korespondencji: marek_gaworski@sggw.edu.pl

ORCID: Marek Gaworski 0000-0003-0313-6280

OCENA WYBRANYCH WŁAŚCIWOŚCI MECHANICZNYCH I CHEMICZNYCH OWOCÓW WYBRANYCH KLONÓW PIGWOWCA JAPOŃSKIEGO (*CHAENOMALES JAPONICA*)

Józef Gorzelany¹, Maciej Tomasz Sochacki², Miłosz Zardzewiały¹,
Grażyna Gajdek¹

¹ Katedra Inżynierii Produkcji Rolno-Spożywczej, Uniwersytet Rzeszowski

² Dyplomant w Katedrze Inżynierii Produkcji Rolno-Spożywczej, Uniwersytet Rzeszowski

Wprowadzenie

Pigwowiec japoński (*Chaomeles japonica*) jest to niewielki kolczasty krzew z rodziny różowatych (*Rosaceae*), dorastający do 1-2 metrów wysokości. Pigwowiec japoński kwitnie wcześnie, na przełomie marca i kwietnia, zdobiąc ogrody pięciopłatkowymi kwiatami w kolorze czerwieni, różu, a czasami pomarańczowego. Jego owoce dojrzewają jesienią, są żółte i mają intensywny aromat. Mimo że są bardzo kwaśne na surowo, często wykorzystuje się je w przetworach^{1,2}. Z uwagi na wysoką zawartość związków bioaktywnych oraz ich oddziaływanie na organizm człowieka ma szerokie zastosowanie gdyż wykorzystuje się go w przemyśle kosmetycznym, farmaceutycznym oraz spożywczym. Zawiera także wiele cennych składników o właściwościach prozdrowotnych^{3,4}.

Pigwowiec japoński jest uprawiany w Japonii i Chinach od stuleci, głównie ze względu na swoje dekoracyjne kwiaty jako roślina ozdobna i aromatyczne owoce wykorzystywane w kuchni, gdzie przerabiane są na dżemy, nalewki i inne produkty oraz w medycynie ludowej^{5,6,7}.

W XX wieku, wraz z rozwojem handlu i wymiany botanicznej, pigwowiec japoński został sprowadzony do Europy i Ameryki Północnej. Jego dekoracyjne właściwości oraz odporność na warunki klimatyczne uczyniły go popularnym eksponatem w ogro-

¹ <https://www.ogarnijogród.pl> 2023.

² <https://dietetycy.org.pl/pigwowiec/>, 2026

³ Watanabe K., Yamamoto T. (2003). *Chaenoma* in Japanese Horticulture and its Impact on Western gardens. *Hortscience*, 38(6), 1045-1049.

⁴ Zhang S.Y., Han L.Y., Zhang H.: *Chaenomeles speciosa*: A review of chemistry and pharmacology. *Biomed. Rep.*, 2014, 2(1), 12-18

⁵ Tarko T., Duda-Chodak A., Pogoń P.: Charakterystyka owoców pigwowca japońskiego i derenia jadalnego. *Żywność. Nauka. Technologia. Jakość.*, 2010, 6 (73), 100-108

⁶ Byczkiewicz Sz., Kobus-Cisowska J., Szulc P., Telichowska A., Szczepaniak O., Dziedziński M. (2019). Pigwowiec Japoński (*Chaenoma japonica* L.) jako surowiec o właściwościach prozdrowotnych aktualny stan wiedzy. *Technika Rolnicza Ogrodnicza Leśna*, 5, 22-25

⁷ Huang W, He J, Nisar MF, Li H, Wan C., (2018) Phytochemical and Pharmacological Properties of *Chaenomeles speciosa*: An Edible Medicinal Chinese Mugua. *Evid Based Complement Alternat Med*. Dec 9;2018:9591845. doi: 10.1155/2018/9591845

dach botanicznych i prywatnych⁸. W Europie pigwowiec japoński jest uprawiany głównie jako roślina ozdobna, ale w niektórych krajach, takich jak Polska, Węgry i Niemcy, produkcja owoców pigwowca również zyskuje na znaczeniu gdyż wykorzystywane są do: produkcji dżemów, soków i innych przetworów⁹. Owoce pigwowca posiadają znaczne wartości odżywcze takie jak: duża zawartość kwasów organicznych, polifenoli, błonnika, witaminy C oraz składników mineralnych. Mają również działanie kojące, wzmacniające, antybakteryjne, obniżają ciśnienie krwi, pomagają także w stanach zapalnych żołądkowo-jelitowych^{10,11,12}.

W Polsce znanych jest powszechnie kilka gatunków: pigwowiec wspaniały, japoński, freisdorfer, katajski oraz okazały¹³. Pigwowce mają bardzo małe wymagania, lubią stanowiska słoneczne lub lekko zacienione, średnio żyzną glebę, są odporne na mróz i susze, ale regularne nawadnianie, zwłaszcza w okresach suszy, jest kluczowe dla optymalnego wzrostu i owocowania. Należy jednak pamiętać o regularnym przycinaniu, które stymuluje wzrost nowych pędów, co przyczynia się do lepszego kwitnienia i owocowania^{14,15}. Pigwowiec jest stosunkowo odporny na choroby i szkodniki, ale może być podatny na infekcje grzybicze, gdzie kluczowe znaczenie ma profilaktyka, w tym usuwanie i niszczenie zakażonych pędów oraz stosowanie środków ochrony roślin w formie oprysków^{16,17,18}.

Owoce są gotowe do zbioru, gdy zmieniają kolor z zielonego na intensywnie żółty lub żółtozielony i osiągają pełny rozmiar, w zależności od gatunku i odmiany. Pełna dojrzałość owoców jest ważna, ponieważ w tym momencie osiągają one maksymalną zawartość cukrów, kwasów organicznych oraz związków fenolowych, co wpływa na ich

⁸ Culley T., Nicole N. (2007). The Beginning of a New Invasive Plant : A history of the Ornamental Callery Pear in the United States. *BioScience*, Volume 57, Issue 11, 956–964.

⁹ Nowak I., Gawlik-Dziki U. (2015) *Chaenomeles* cultivation and fruit utilization in central Europe. *Horticultural Science*, 42(1), 51-57

¹⁰ Byczkiewicz Sz., Kobus-Cisowska J., Szulc P., Telichowska A., Szczepaniak O., Dziedziński M. (2019). Pigwowiec Japoński (*Chaenomeles japonica* L.) jako surowiec o właściwościach prozdrowotnych aktualny stan wiedzy. *Technika Rolnicza ogrodnicza* Leśna, 5,22-25.

¹¹ Antoniewska A., Rutkowska J., Adamska K (2017). Charakterystyka owoców pigwowca japońskiego oraz ich zastosowanie w przemyśle spożywczym. *Żywność. Nauka. Technologia. Jakość*, 2017, 24, 2 (111), 5 – 15

¹² Nahorska A., Dzwoniarska M., Thiem B.: Owoce pigwowca japońskiego (*Chaenomeles japonica* (Thunb.) Lindl. ex Spach) źródłem substancji biologicznie aktywnych. *Postępy Fitoterapii*, 2014, 4, 239-246.

¹³ <https://derenjadalny.com/oferta/pigwowiec> 2018

¹⁴ Thompson I., Green P., (2018). Cultivation and disease resistance of chaenomeles species. *Horticultural Science*, 43(3), 105-110.

¹⁵ Zhang R., Li S., Zhu Z., He J. (2019). Recent advances in valorization of *Chaenomeles* fruit: A review of botanical profile, phytochemistry, advanced extraction technologies and bioactivities, *Trends in Food Science & Technology*, 91, 467-482.

¹⁶ Thompson I., Green P., (2018). Cultivation and disease resistance of chaenomeles species. *Horticultural Science*, 43(3), 105-110

¹⁷ <https://www.ogarnijogród.pl>, 2023

¹⁸ Rumpunen K.: *Chaenomeles*: Potential new fruit crop for northern Europe. *Trends in New Crops and New Uses*. Alexandria, USA: ASHA Press, 2002, 385-392.

smak i wartość odżywczą^{19,20}. Ze względu na twardość owoców oraz kolce obecne na gałęziach krzewu, zbiory przeprowadza się często ręcznie. Ręczny zbiór minimalizuje ryzyko mechanicznego uszkodzenia owoców, które może prowadzić do przyspieszonego gnicia i obniżenia jakości surowca w czasie przechowywania. Na dużych plantacjach można zbierać mechanicznie owoce, ale powinny być zbierane w suchy dzień, aby zmniejszyć ryzyko infekcji patogenami podczas przechowywania²¹. Wytrzymałość mechaniczna owoców jest wynikiem połączenia czynników związanych z ich strukturą, składem morfologicznym, etapem dojrzałości, oraz różnicami odmianowymi. W badaniach mechanicznych popularne są testy przebiccia stemplem (puncture test), w których rejestruje się m.in. siłę przebiccia, odkształcenie skórki i miąższu przy przebicciu oraz energię przebiccia, a pomiary wykonuje się w charakterystycznych miejscach owocu²².

Znajomość właściwości chemicznych oraz mechanicznych owoców pigwowca japońskiego ma istotne znaczenie z punktu widzenia praktyki produkcyjnej i technologicznej. Parametry te odgrywają ważną rolę na etapie zbioru, transportu oraz przechowywania owoców, wpływając na ich podatność na uszkodzenia mechaniczne oraz straty pozbiornicze. Odpowiednie określenie cech jakościowych surowca umożliwia właściwy dobór metod postępowania pozbiorniczego, a także sprzyja efektywniejszemu wykorzystaniu owoców w przemyśle spożywczym²³.

Badania nad zmianami biochemicznymi owoców pigwowca japońskiego wykazały, że warunki przechowywania, takie jak temperatura i wilgotność, w istotny sposób wpływają na ich skład chemiczny i właściwości jakościowe. W przeprowadzonych analizach stwierdzono, że owoce zachowują wysoką jakość przy przechowywaniu w niższych temperaturach i odpowiedniej wilgotności, natomiast wydłużony czas składowania prowadzi do zmniejszenia zawartości niektórych cennych składników, jak witamina C i związki fenolowe, a także może powodować zmiany sensoryczne surowca²⁴.

Owoce przechowywane w niższych temperaturach i przy ograniczonym dostępie do tlenu wykazują również mniejsze straty witaminy C i związków fenolowych, co przekłada się na wyższą wartość odżywczą przetworów^{25,26}.

¹⁹ Watychowicz K., Janda K., Jakubczyk K., Wolska J.: Chaenomeles-health promoting benefits. *Roczniki Państwowego Zakładu Higieny*, 2017, 68(3), 217.

²⁰ <https://poradnikogrodniczy.pl> 2023

²¹ Tarko T., Duda-Chodak A., Pogoń P.: Charakterystyka owoców pigwowca japońskiego i derenia jadalnego. *Żywność. Nauka. Technologia. Jakość.*, 2010, 6 (73), 100-108.

²² Gorzelany J., Kuźniar P., Zardzewiały M., Pentoś K., Murawski T., Wojciechowski W., Kurek J., (2024). The Use of Machine Learning to Assess the Impact of the Ozonation Process on Selected Mechanical Properties of Japanese Quince Fruits. *Agriculture*, 14(11).

²³ Li Z., Thomas C. (2014). Quantitative evaluation of mechanical damage to fresh fruits. *Trends in Food Science & Technology*, 35(2), 138-150.

²⁴ Vila R., Granados M.V., Hellin P., Kauppinen S., Laencina J., Rumpunen K., Ros J.M. (2003). Biochemical Changes in Chaenomeles Fruits and Fruit Juice during Ripening and Storage. W: Rumpunen K. (red.), *Japanese Quince – Potential Fruit Crop for Northern Europe*. Department of Crop Science, Swedish University of Agricultural Sciences, Alnarp, 59-168.

²⁵ Banaś A., Korus A. (2016). Promoting qualities of Japanese quince fruit (Chaenomeles japonica). *Medycyna rodzinna*. Vol. 2016, No. 2, 83-85 ref. 15

Celem pracy było określenie wpływu czasu przechowywania i warunków przechowywania oraz ozonowania na wybrane właściwości chemiczne i mechaniczne oraz zawartość związków bioaktywnych w owocach 2 nowych klonów pigwowca.

Zakres pracy obejmował przygotowanie ręczne wzorcowych próbek owoców (ręczny zbiór owoców na plantacji i transport do laboratorium), pomiar wybranych właściwości mechanicznych owoców w procesie przebicia skórki i miąższu, w wybranych dniach ich przechowywania chłodniczego. Określenie poszczególnych parametrów chemicznych (zawartości wody, pH, kwasowości, zawartości polifenoli ogółem, zawartości kwasu askorbinowego a także aktywności antyoksydacyjnej) owoców pigwowca.

Materiał badawczy stanowiły owoce 2 klonów pigwowca o masie po około 3 kg, zebrane ręcznie w fazie dojrzałości zbiorczej na plantacji doświadczalnej Instytutu Sadowniczego w Skierniewicach. Próbkę dostarczono do Laboratorium Zakładu Inżynierii Produkcji Rolno-Spożywczej gdzie materiał badawczy odpowiednio podzielono na 3 jednakowe próbki. Dwie próbki z każdej odmiany, poddano ozonowaniu a jedna z próbek każdej odmiany stanowiła kontrolę.

Ozonowanie wykonano jednorazowo po zbiorze owoców. Owoce pigwowca poddano działaniu gazowego ozonu w komorze o wymiarach: długość 1.0 m, szerokość 0,5 m, wysokość 0,4 m. Zabieg ozonowania wykonywano z wykorzystaniem generatora ozonu Korona A40 (Korona, Piotrków Trybunalski, Polska). Przy stałym przepływie $40 \text{ g O}_3 \cdot \text{h}^{-1}$, stężenie gazowego ozonu $0,01 \text{ ml} \cdot \text{L}^{-1}$ było dostarczane przez 15 min i przez 30 min. W procesie fumigacji owoców stężenie gazu ozonowego mierzono detektorem ozonu w zakresie pomiarowym 0–1000 ppm. Następnie, po procesie fumigacji owoce pigwowca umieszczono w pojemnikach o pojemności 1,0 kg w warunkach chłodniczych (lodówka) w temperaturze 2°C przez okres 2 miesięcy.

Oznaczanie barwy owoców pigwowca przeprowadzono przy wykorzystaniu kolorymetru NR20XE (Łódź, Polska) oraz oprogramowania komputerowego CQCS3 (Łódź, Polska). Kolorymetr używany do pomiarów służył do odczytywania wartości kolorów w systemie $\text{CIE}^* \text{L}^* \text{a}^* \text{b}^*$. W pojemnikach, które zostały umieszczone w lodówce wybrano i opisano po 3 charakterystyczne owoce dla danej odmiany, na których wykonano pomiary, każdy owoc zbadano w trzech miejscach. Pomiary wykonano w trzech terminach: po zbiorze, po jednym i po dwóch miesiącach przechowywania. Przed każdą serią pomiarów mechanicznych owoców przeprowadzono ich pomiar za pomocą suwmiarki i wagi laboratoryjnej (grubość, szerokość, długość oraz wagę).

Oznaczanie zawartości wody w owocach klonów pigwowca wykonano metodą suszarniczą zgodnie z PN-90/A-75101-03;1990. Odważono po 15 gramów próbek owoców pigwowca na szalkach Petriego i umieszczono w suszarce laboratoryjnej SLW 115 SMART (Łódź, Polska). Suszenie było prowadzone w temperaturze 105°C . Po wysuszeniu próbki ponownie zważono i obliczono zawartość wody w owocach, w trzech terminach: po zbiorze, po miesiącu i dwóch miesiącach przechowywania.

Pomiary siły przebicia skórki i miąższu pojedynczych owoców pigwowca stemplem o średnicy 4 mm wykonywane były za pomocą maszyny Texture Analyzer CT3 (Middleboro, USA). Pomiar był dokonywany na 3 owocach w 3 miejscach każdego owocu.

²⁶ Vila R., Granados M.V., Hellín P., Kauppinen S., Laencina J., Rumpunen K., Ros J.M. (2003). Biochemical Changes in Chaenomeles Fruits and Fruit Juice during Ripening and Storage. W: Rumpunen K. (red.), Japanese Quince – Potential Fruit Crop for Northern Europe. Department of Crop Science, Swedish University of Agricultural Sciences, Alnarp, 59–168.

Podczas testów przebicia stemplem owoców rejestrowane były: siła przebicia N, odkształcenie mm oraz wartość energii potrzebnej do przebicia mj. Testy przebicia przeprowadzono w trzech terminach odpowiednio po zbiorze, miesiącu oraz po dwóch miesiącach przechowywania.

Oznaczanie pH oraz kwasowości owoców pigwowca zostało przeprowadzone zgodnie z PN-EN 12147:2000. Metoda polegała na miareczkowaniu potencjometrycznym roztworem 0,1 M NaOH, do pH= 8,1. Oznaczenia zostały wykonane w trzech powtórzeniach za pomocą titratora potencjometrycznego TitroLine 5000 (Gräffling, Niemcy).

Zawartość kwasu askorbinowego w owocach pigwowca została oznaczona zgodnie z PN-A-04019:1998.

Oznaczanie ogólnej zawartości polifenoli w owocach analizowanych owoców pigwowca oznaczono metodą Folina-Ciocalteu'a. Wyniki wyrażono w mg GAE/100 g⁻¹ owoców. Pomiar wykonywany był w trzech powtórzeniach. Na każdy przypadający termin badań odpowiednio po zbiorze, po miesiącu i dwóch miesiącach przechowywania.

Oznaczenie aktywności antyoksydacyjnej owoców haskapu japońskiego dokonano z wykorzystaniem 3 metod: DPPH, opisanej w Jurčaga i in. (2021)²⁷, ABTS⁺, opisaną przez Wojtasik i in., 2011²⁸ oraz FRAP, opisaną przez Benzie i Strain, 1996²⁹. Oznaczenia aktywności antyoksydacyjnej owoców każdą metodą zostały wykonane w trzech powtórzeniach.

Analizę statyczną wykonano przy pomocy programu Statistica 13.3. (TIBCO Software Inc., Tulsa, OK, USA). Do dwukierunkowej analizy wariancji (ANOVA) i testu istotności LSD zastosowano poziom istotności $\alpha = 0,05$. Do statystycznego testowania wyników badań zastosowano test Tukeya.

Wyniki badań

Właściwości morfologiczne oraz zawartość wody w owocach pigwowca japońskiego

W badaniach cech morfologicznych owoców pigwowca japońskiego, nie odnotowano istotnych różnic w długości owoców, szerokości oraz wadze owoców (tabela 1). Odnotowano natomiast istotne różnice w grubości owoców. Owoce pigwowca Klon

²⁷ Jurčaga L., Bobko M., Kolesárová A., Bobková A., Demianová A., Haščík P., Lubomír B., Mendelová A., Ondřej Bučko O., Kročko M., Čech M. (2021). Blackcurrant (*Ribes nigrum* L.) and Kamchatka Honeysuckle (*Lonicera caerulea* var. *Kamtschatica*) Extract Effects on Technological Properties, Sensory Quality, and Lipid Oxidation of Raw-Cooked Meat Product (Frankfurters), *Foods*, 10(12), 2957

²⁸ Wojtasik S., Sroka Z., Zbikowska B., Drys A. (2011). The measurement of antiradical of some plant raw materials and extract with use of TAU (Total Antiradical Unit). *Food Chemistry*, 129(2), 358-364

²⁹ Benzie, I. i Strain, J. (1996) Zdolność osocza do redukcji jonów żelaza (FRAP) jako miara „mocy antyoksydacyjnej: test FRAP”. *Analytical Biochemistry*, 239, s. 70–76.

7d/8 były grubsze średnio o 6,7%. Przechowywanie chłodnicze istotnie wpłynęło na wszystkie analizowane cechy morfologiczne, zmniejszając wielkość badanych owoców. Po 60 dniach przechowywania owoców pigwowca japońskiego, odnotowano spadek wagi owoców o 13,6%. Wykorzystanie gazowego ozonu miało istotny wpływ na wagę owoców. Owoce pigwowca japońskiego ozonowane ustaloną dawką przez 30 minut, charakteryzowały się większą wagą średnio o 5,1% w analizowanym czasie przechowywania w porównaniu do próby kontrolnej. Zawartość wody w świeżych owocach pigwowca wynosiła od 85,78 % dla klonu 8c/12 do 85,99 % dla klonu 7d/8. W trakcie przechowywania chłodniczego (60 dni) stwierdzono spadek zawartości wody w badanych owocach wynoszący 2,39 %. W owocach poddanych ozonowaniu przez 15 minut odnotowano spadek zawartości wody wynoszący 0,2% w stosunku do próby kontrolnej.

Tabela.1. Właściwości morfologiczne świeżych owoców pigwowca japońskiego, poddanych ozonowaniu oraz w czasie przechowywania

Zmienna		Długość (mm)	Szerokość (mm)	Grubość (mm)	Waga (g)	Zawartość wody (%)
Klon	8c/12	46,44a±3,71	47,03a±3,96	41,09a±4,47	51,44a±10,06	85,78a±1,56
	7d/8	45,59a±3,62	46,33a±3,73	44,10b±4,93	53,16a±12,09	85,99a±0,75
Poziom istotności		-	-	*	-	-
Czas przechowywana (dni)	0	48,04b±3,12	48,51b±3,61	43,38a±5,87	57,77b±12,49	86,91b±0,74
	31	45,31a±4,64	46,23a±4,66	42,78a±5,04	49,31a±12,01	86,23b±0,45
	60	44,69a±1,92	45,31a±2,23	41,62a±3,64	49,89a±5,75	84,52a±0,82
Poziom istotności		*	*	*	***	*
Czas ekspozycji ozonem (min)	0	46,10a±3,35	46,64a±3,42	40,94a±5,49	52,16a±9,84	85,95a±0,98
	15	45,18a±3,92	45,98a±4,38	43,00ab±4,7	50,08a±10,36	85,81a±1,36
	30	46,76a±3,66	47,44a±3,68	43,84b±4,24	54,66a±12,86	85,9a±1,39
Poziom istotności		-	-	*	**	-

Źródło: opracowanie własne

Ocena wybranych parametrów chemicznych owoców pigwowca

Ocena zawartości pH i kwasowości ogólnej

Średnia wartość pH dla obu klonów pigwowca wynosiła 2,99 natomiast wartość kwasowości ogólnej wynosiła 3,66 g·100 g⁻¹. Podczas przechowywania chłodniczego nie odnotowano istotnego wpływu procesu ozonowania na wartości pH oraz kwasowość ogólną owoców pigwowca.

Ocena zawartości polifenoli

Owoce pigwowca zawierają różnorodne związki polifenolowe. Owoce pigwowca japońskiego według autorów zawierają 645 mg/100 g związków fenolowych ogółem

w tym: flawonole, procyanidyna B2, epikatechina, katechina oraz procyanidyna B1^{30,31}.

Na podstawie uzyskanych wyników całkowita zawartość polifenoli w świeżych owocach pigwowca w klonach 8c/12 i 7d/8 wynosiła od 379,15 do 400,38 GAE·100 g⁻¹. Czas przechowywania nie miał wpływu na zmianę zawartości polifenoli, odnotowano nieznaczny spadek wartości wynoszący 0,1% po dwóch miesiącach przechowywania w stosunku do próby kontrolnej. Zastosowany proces ozonowania wpłynął pozytywnie na zawartość polifenoli w owocach, odnotowano 1,8% wzrost zawartości polifenoli po ich ozonowaniu trwającym 15 minut w stosunku do próby kontrolnej (tabela 2).

Ocena zawartości witaminy C

Pigwowiec japoński uważany jest za roślinę o wysokiej zawartości witaminy C 55-92 mg·100 g⁻¹³².

W przeprowadzonych badaniach odnotowano znacznie wyższą wartość witaminy C (tabela 2). Zawartość witaminy C w owocach pigwowca dla klonów 8c/12 oraz 7d/8 wynosiła odpowiednio: 96,70 mg·100 g⁻¹ 117,22 mg·100 g⁻¹. Czas przechowywania

Tabela 2. Wartości witaminy C i polifenoli w zależności od czasu przechowywania i procesu ozonowania

Zmienna	Kwas askorbinowy (mg·100 g ⁻¹)	Całkowita zawartość związków fenolowych (mg GAE·100 g ⁻¹)
Klon	96,70a±13,96 117,22b±13,14	379,15a±1,20 400,38b±2,00
Poziom istotności	***	***
Czas przechowywania (dni)	122,94c±10,19 110,60b±13,2 91,45a±11,84	390,38a±4,80 388,92a±4,80 389,95a±5,10
Poziom istotności	***	-
Czas ekspozycji ozonem (min)	103,41a±18,87 108,97b±17,00 108,49b±15,22	386,39a±3,90 393,31b±5,10 389,58a±5,20
Poziom istotności	*	**

Źródło: opracowanie własne

³⁰ Nahorska A., Dzwoniarska M., Thiem B.(2014) Owoce pigwowca japońskiego (Chaenomeles japonica (Thunb.) Lindl. ex Spach) źródłem substancji biologicznie aktywnych. Postępy Fitoterapii, 4, 239-246.

³¹ Miao J., Zhao Ch., Li X., Chen X., Mao X., Huang H., Wang T., Gao W., (2016) Chemical Composition and Bioactivities of Two Common Chaenomeles Fruits in China: Chaenomeles speciosa and Chaenomeles sinensis. Journal of Food Science, Vol. 81, Nr. 8, 2049-2058.

³² Nahorska A., Dzwoniarska M., Thiem B.(2014) Owoce pigwowca japońskiego (Chaenomeles japonica (Thunb.) Lindl. ex Spach) źródłem substancji biologicznie aktywnych. Postępy Fitoterapii, 4, 239-246.

wpłynął istotnie na zawartość witaminy C w owocach. Po dwóch miesiącach przechowywania odnotowano 25,6% spadek zawartości witaminy C w porównaniu do owoców świeżych. Natomiast zastosowany proces ozonowania wpłynął pozytywnie na zawartość witaminy C. Odnotowano wzrost o 4,7% w owocach poddanych ozonowaniu przez 30 minut w porównaniu do owoców nieozonowanych.

Ocena wartości antyoksydacyjnych owoców

Owoce pigwowca wykazują znaczną aktywność antyoksydacyjną dzięki czemu są coraz częściej używane w różnych gałęziach przemysłu^{33,34,35}. Zdolność antyoksydacyjna świeżych owoców analizowana metodą DPPH (Tabela 3) miała wartość 2,51 oraz 2,52 mg·ml kolejno dla klonów 7d/8 i 8c/12. W trakcie ozonowania nie odnotowano różnic. Zdolność antyoksydacyjna świeżych owoców analizowana metodą ABTS w badanych klonach 7d/8 oraz 8c/12 wynosiła odpowiednio 1,69 oraz 1,75 TE·g⁻¹. Czas przechowywania oraz ekspozycji ozonem nie wpłynęły istotnie na wartość ABTS.

Zdolność antyoksydacyjna świeżych owoców analizowana metodą FRAP (tabela 3) miała wartości 0,34 oraz 0,35 FE²⁺·100 g⁻¹ dla klonów 8c/12 i 7d/8. Owoce pigwowca japońskiego ozonowane przez 30 minut charakteryzowały się wyższą wartością FRAP o 6,6 % w stosunku do owoców nieozonowanych.

Tabela 3. Wartości antyoksydantów w zależności od czasu przechowywania i ekspozycji ozonem

Zmienna	DPPH IC50 (mg·ml)	ABTS (uM TE·g ⁻¹)	FRAP (mM FE ²⁺ · 100 g ⁻¹)
Klon	2,52a±0,31	1,75b±0,31	0,34a±0,03
	2,51a±0,46	1,69a±0,29	0,35a±0,06
Poziom istotności	-	**	-
Długość przechowywania (dni)	2,52b±0,31	1,71a±0,38	0,35a±0,06
	2,50a±0,33	1,71a±0,34	0,35a±0,05
	2,53b±0,51	1,72a±0,46	0,35a±0,05
Poziom istotności	**	-	-
Czas ekspozycji ozonem (min)	2,50a±0,19	1,69a±0,27	0,34a±0,03
	2,53b±0,24	1,74b±0,34	0,35a±0,05
	2,50a±0,15	1,71a±0,46	0,36b±0,01
Poziom istotności	*	**	*

Źródło: opracowanie własne

³³ Byczkiewicz Sz., Kobus-Cisowska J., Szulc P., Telichowska A., Szczepaniak O., Dziedziński M. (2019). Pigwowiec Japoński (*Chaenomeles japonica* L.) jako surowiec o właściwościach prozdrowotnych aktualny stan wiedzy. *Technika Rolnicza Ogrodnictwa Leśna*, 5, 22-25

³⁴ Du H., Wu J., Li H.: Polyphenols and triterpenes from *Chaenomeles* fruits: Chemical analysis and antioxidant activities assessment. *Food Chem.*, 2013, 141, 4260-4268.

³⁵ Zhang M., Zhao R., Zhou S., Liu W., Liang Y., Zhao Z.: Chemical characterization and evaluation of the antioxidants in *Chaenomeles* fruits by an improved HPLC-TOF/MS coupled to an online DPPH-HPLC method. *Journal of Environmental Science and Health, Part C*, 2018, 36(1), 43-62

Badania właściwości mechanicznych owoców pigwowca w aspekcie ograniczenia strat w czasie zbioru i przechowywania

Zachowanie wysokiej jakości oraz trwałości owoców na etapie przechowywania i obrotu handlowego stanowi wyzwanie zarówno dla producenta, jak również osób pośredniczących w handlu. Trwałość owoców jest kształtowana przez szereg czynników agrotechnicznych, klimatycznych i technologicznych. Cechami charakteryzującymi świeże owoce są: trwające nadal procesy dojrzewania, intensywne kolory oraz zapachy^{36,37}. Znajomość właściwości fizycznych, fizjologicznych oraz mechanicznych owoców jest bardzo ważna w szczególności w postępowaniu podczas zbioru, transportu i ich przechowywaniu. Często występują uszkodzenia mechaniczne takie jak stłuczenie, zgniecenie lub otarcie, wiąże się to z pogorszeniem jakości surowca co w konsekwencji może doprowadzać do wyeliminowania partii surowca z rynku³⁸. Wytrzymałość mechaniczna owoców zależna jest od kilku czynników takich jak: struktura, skład morfologiczny, etap dojrzałości i różnice między odmianami. Wytrzymałość mechaniczna jest zależna od procesów metabolicznych, które zachodzą w owocach również w trakcie przechowywania. Owoce pigwowca charakteryzują się wysoką zawartością kwasów organicznych, błonnika i pektyn, co wpływa na ich strukturę i właściwości mechaniczne. W badaniach właściwości mechanicznych owoców stosuje się różne testy wytrzymałościowe: rozciąganie, ściskanie, przebicie tkanki, skórki. W przypadku owoców pigwowca uzyskane wyniki pokazują, że siła przebicia skórki i miąższu maleje w czasie, szczególnie w pierwszych tygodniach przechowywania. Spadki te mogą osiągnąć nawet 34% w zależności od warunków przechowywania oraz odmiany³⁹.

Uszkodzenia mechaniczne nie tylko mają wpływ na wygląd zewnętrzny surowca, ułatwiają także atak patogenom gnilnym⁴⁰. W miarę przechowywania owoców spada ich przydatność technologiczna a co za tym idzie odporność na uszkodzenia mechaniczne maleje. Ozon jest gazem bezpiecznym, ponieważ szybko rozkłada się do tlenu

³⁶ El-Ramady, H.R., Domokos-Szabolscy, È., Abdalla, N. A., Taha, H. S., i Fári, M. (2015). Postharvest management of fruits and vegetables storage. *Sustainable Agriculture Reviews: Volume 15*, 65-152.

³⁷ Michalski P. (2016). Innowacyjne rozwiązania wpływające na pozbiorną trwałość owoców. *Polskie towarzystwo Technologów żywności*, 166-174.

³⁸ Gorzelany Józef, Basara Oskar, Kuźniar Piotr, Pawłowska Agata, Belcar Justyna.: Wpływ ozonowania na właściwości mechaniczne i chemiczne owoców rokitnika zwyczajnego (*Hippophaë rhamnoides* L.). *Acta Universitatis Cibiniensis. Seria E: Technologia Żywności*. 2022: Cz. 26, wyd. 2, s. 183-194.

³⁹ Antoniewska A., Rutkowska J., Adamska K (2017). Charakterystyka owoców pigwowca japońskiego oraz ich zastosowanie w przemyśle spożywczym. *Żywność. Nauka. Technologia. Jakość*, 2017, 24, 2 (111), 5 – 15

⁴⁰ El-Ramady, H.R., Domokos-Szabolscy, È., Abdalla, N. A., Taha, H. S., i Fári, M. (2015). Postharvest management of fruits and vegetables storage. *Sustainable Agriculture Reviews: Volume 15*, 65-152.

oraz nie pozostawia żadnych pozostałości, natomiast ozonowany produkt nadaje się do certyfikacji jako żywność ekologiczna⁴¹.

W celu zbadania wybranych właściwości mechanicznych owoców pigwowca, wykonano pomiary siły przebicia skórki i miąższu w owocach poddanych ekspozycji na ozon oraz prób kontrolnych. Odnotowane wyniki umieszczono w tabeli 4.

Tabela 4. Wartości siły przebicia oraz energii potrzebnej do przebicia w zależności od czasu przechowywania oraz ekspozycji ozonem

Zmienna		Siła przebicia (N)	Odkształcenie (mm)	Wartość energii potrzebnej do przebicia (mJ)
Klon	8c/12	28,64a±4,92	2,52b±1,11	61,73a±13,11
	7d/8	36,25b±4,24	2,41a±0,88	77,73b±11,94
Poziom istotności		***	**	***
Czas	0	30,85a±7,29	1,56a±0,44	55,74a±9,52
przechowywania	31	31,70b±5,33	2,28b±0,52	72,85b±13,56
(dni)	60	34,79c±4,21	3,54c±0,73	80,60c±8,14
Poziom istotności		***	***	***
Czas	0	31,92a±5,50	2,42a±0,85	71,29b±15,92
ekspozycji	15	32,85a±6,32	2,46a±1,00	71,20b±14,19
ozonem (min)	30	32,56a±6,11	2,52a±1,15	66,71a±14,22
Poziom istotności		-	-	***

Źródło: opracowanie własne

Średnia wartość siły przebicia stemplem wynosiła 32,45 N. Przechowywanie chłodnicze istotnie wpłynęło na wzrost siły przebicia. Po 60 dniach przechowywania owoców pigwowca japońskiego odnotowano wzrost siły przebicia o 11,3%. Średnia wartość energii potrzebnej do przebicia wynosiła 69,73 mJ. Przechowywanie chłodnicze istotnie wpłynęło na wzrost tej siły. Po 60 dniach przechowywania chłodniczego owoców pigwowca japońskiego odnotowano wzrost energii potrzebnej do przebicia o 30,8%. Wykorzystanie gazowego ozonu miało istotny wpływ na wartość energii potrzebnej do przebicia. Owoce ozonowane ustaloną dawką przez 30 minut, charakteryzowały się większą energią potrzebną do przebicia o 6,6%. Przechowywanie chłodnicze istotnie wpłynęło na wartość odkształcenia. Po 60 dniach przechowywania chłodniczego owoców pigwowca japońskiego odnotowano wzrost wartości odkształcenia owoców o 55,9%.

⁴¹ Selma M.V., Ibáñez A.M., Cantwell M., Sulsow T. (2008). Reduction by gaseous ozone of Salmonella and microbial flora associated with fresh-cut cantaloupe. Food microbiol. Food Microbiol. 25, 558-565

Wnioski

1. Średnia zawartość wody w badanych owocach była zróżnicowana w zależności od badanego klonu. W czasie przechowywania zawartość wody spadała, natomiast owoce poddane ozonowaniu utrzymały podobne wartości co świeże owoce.
2. Wykorzystanie gazowego ozonu miało istotny wpływ na wagę owoców, odnotowano spadek wagi owoców o 5,1%. Natomiast przechowywanie chłodnicze istotnie wpłynęło na wszystkie analizowane cechy morfologiczne, zmniejszając wielkość badanych owoców. Po 60 dniach przechowywania chłodniczego odnotowano spadek wagi owoców o 13,6%.
3. Średnia zawartość witaminy C w owocach analizowanych klonów wynosiła od 96,70 do 117,22 mg·100 g⁻¹. Czas przechowywania wpłynął istotnie na zawartość witaminy gdyż odnotowano spadek rzędu 25,6%. Natomiast samo ozonowanie pozytywnie wpłynęło na jej zawartość, wzrost o 4,7%.
4. Czas ekspozycji ozonem wpłynął pozytywnie na zawartość polifenoli w owocach względem próby kontrolnej.
5. Zastosowanie procesu ozonowania pozytywnie wpłynęło na wartość antyoksydantów w przypadku zastosowanych metod oznaczania takich jak DPPH oraz FRAP, w metodzie ABTS czas ekspozycji ozonem nie miał wpływu w porównaniu do próby kontrolnej.
6. Średnia wartość siły przebicia owoców wynosiła 32,45 N, czas przechowywania jak również czas ozonowania pozytywnie wpłynęły na wzrost tej siły w porównaniu do owoców świeżych, natomiast wartość energii potrzebnej do przebicia wraz z przechowywaniem ulegała powiększeniu a w przypadku owoców poddanych ozonowaniu malała.
7. Przechowywanie chłodnicze miało istotny wpływ na wzrost odkształcenia owoców pigwowca japońskiego w procesie przebicia stemplem, po 60 dniach przechowywania odnotowano wzrost wartości odkształcenia o 55,9%.

Bibliografia

- Antoniewska A., Rutkowska J., Adamska K (2017). Charakterystyka owoców pigwowca japońskiego oraz ich zastosowanie w przemyśle spożywczym. *Żywność. Nauka. Technologia. Jakość*, 2017, 24, 2 (111), 5 – 15.
- Banaś A., Korus A. (2016). Promoting qualities of Japanese quince fruit (*Chaenomeles japonica*). *Medycyna rodzinna*. Vol. 2016, No. 2, 83-85 ref. 15
- Benzie, I. i Strain, J. (1996) Zdolność osocza do redukcji jonów żelaza (FRAP) jako miara „mocy antyoksydacyjnej: test FRAP”. *Analytical Biochemistry*, 239, s. 70–76.
- Byczkiewicz Sz., Kobus-Cisowska J., Szulc P., Telichowska A., Szczepaniak O., Dziedziński M. (2019). Pigwowiec Japoński (*Chaenomeles japonica* L.) jako surowiec o właściwościach prozdrowotnych aktualny stan wiedzy. *Technika Rolnicza Ogrodnicza Leśna*, 5, 22-25
- Culley T., Nicole N. (2007). The Beginning of a New Invasive Plant : A history of the Ornamental Callery Pear in the United States. *BioScience*, Volume 57, Issue 11, 956–964.
- Du H., Wu J., Li H., (2013). Polyphenols and triterpenes from *Chaenomeles* fruits: Chemical analysis and antioxidant activities assessment. *Food Chem.*, 141, 4260-4268.

- El-Ramady, H.R., Domokos-Szabolcsy, È., Abdalla, N. A., Taha, H. S., i Fári, M. (2015). Post-harvest management of fruits and vegetables storage. *Sustainable Agriculture Reviews: Volume 15*, 65-152.
- Gorzelany J., Basara O., Kuźniar P., Pawłowska A., Belcar J., (2022).: Wpływ ozonowania na właściwości mechaniczne i chemiczne owoców rokitnika zwyczajnego (*Hippophaë rhamnoides* L.). *Acta Universitatis Cibiniensis. Seria E: Technologia Żywności. Cz. 26*, wyd. 2, s. 183-194.
- Gorzelany J., Kuźniar P., Zardzewiały M. Pentoś K., Murawski T., Wojciechowski W., Kurek J., (2024). The Use of Machine Learning to Assess the Impact of the Ozonation Process on Selected Mechanical Properties of Japanese Quince Fruits. *Agriculture*, 14(11).
<https://derenjadalny.com/oferta/pigwowiec> 2018
<https://dietetycy.org.pl/pigwowiec/2026>
<https://www.ogarnijogród.pl> 2023
<https://poradnikogrodniczy.pl> 2023
- Huang W, He J, Nisar MF, Li H, Wan C., (2018). Phytochemical and Pharmacological Properties of *Chaenomeles speciosa*: An Edible Medicinal Chinese Mugua. *Evid Based Complement Alternat Med*. Dec 9;2018:9591845. doi: 10.1155/2018/9591845
- Jurčaga L., Bobko M., Kolesárová A., Bobková A., Demianová A., Haščík P., Lubomír B., Mendelová A., Ondřej Bučko O., Kročko M., Čech M. (2021). Blackcurrant (*Ribes nigrum* L.) and Kamchatka Honeysuckle (*Lonicera caerulea* var. Kamtschatica) Extract Effects on Technological Properties, Sensory Quality, and Lipid Oxidation of Raw-Cooked Meat Product (Frankfurters), *Foods*, 10(12), 2957
- Li Z., Thomas C. (2014). Quantitative evaluation of mechanical damage to fresh fruits. *Trends in Food Science & Technology*, 35(2), 138–150.
- Miao J., Zhao Ch., Li X., Chen X, Mao X., Huang H., Wang T., Gao W., (2016). Chemical Composition and Bioactivities of Two Common Chaenomeles Fruits in China: *Chaenomeles speciosa* and *Chaenomeles sinensis*. *Journal of Food Science*, Vol. 81, Nr. 8, 2049-2058.
- Michalski P. (2016). Innowacyjne rozwiązania wpływające na pozbiórczą trwałość owoców. *Polskie towarzystwo Technologów żywności*, 166-174.
- Nahorska A., Dzwoniarska M., Thiem B.(2014). Owoce pigwowca japońskiego (*Chaenomeles japonica* (Thunb.) Lindl. ex Spach) źródłem substancji biologicznie aktywnych. *Postępy Fitoterapii*, 4, 239-246.
- Nowak I., Gawlik-Dziki U. (2015). *Chaenomeles* cultivation and fruit utilization in central Europe. *Horticultural Science*, 42(1), 51-57
- Rumpunen K., (2002). *Chaenomeles*: Potential new fruit crop for northern Europe. *Trends in New Crops and New Uses*. Alexandria, USA: ASHA Press, 385-392.
- Selma M.V., Ibáñez A.M., Cantwell M., Sulsow T. (2008). Reduction by gaseous ozone of *Salmonella* and microbial flora associated with fresh-cut cantaloupe. *Food microbiol. Food Microbiol.* 25, 558-565
- Tarko T., Duda-Chodak A., Pogoń P.,(2010). Charakterystyka owoców pigwowca japońskiego i derenia jadalnego. *Żywność. Nauka. Technologia. Jakość.*, 6 (73), 100-108.
- Thompson I., Green P., (2018). Cultivation and disease resistance of chaenomeles species. *Horticultural Science*, 43(3), 105-110.
- Watanabe K., Yamamoto T., (2003). Chaenomeles in Japanese Horticulture and its Impact on Western gardens. *Hortscience*, 38(6), 1045-1049.
- Watychowicz K., Janda K., Jakubczyk K., Wolska J., (2017). Chaenomeles-health promoting benefits. *Roczniki Państwowego Zakładu Higieny*, 68(3), 217-227.
- Wojtasik S., Sroka Z., Zbikowska B., Drys A., (2011). The measurement of antiradical of some plant raw materials and extract with use of TAU (Total Antiradical Unit). *Food Chemistry*, 129(2), 358-364.

- Vila R., Granados M.V., Hellín P., Kauppinen S., Laencina J., Rumpunen K., Ros J.M., (2003). Biochemical Changes in Chaenomeles Fruits and Fruit Juice during Ripening and Storage. W: Rumpunen K. (red.), Japanese Quince – Potential Fruit Crop for Northern Europe. Department of Crop Science, Swedish University of Agricultural Sciences, Alnarp, 59–168.
- Zhang M., Zhao R., Zhou S., Liu W., Liang Y., Zhao Z., (2018). Chemical characterization and evaluation of the antioxidants in Chaenomeles fruits by an improved HPLC-TOF/MS coupled to an online DPPH-HPLC method. Journal of Environmental Science and Health, Part C, 36(1), 43-62
- Zhang R., Li S., Zhu Z., He J. (2019). Recent advances in valorization of Chaenomeles fruit: A review of botanical profile, phytochemistry, advanced extraction technologies and bioactivities, Trends in Food Science & Technology, 91, 467-482.
- Zhang S.Y., Han L.Y., Zhang H., (2014). Chaenomeles speciosa: A review of chemistry and pharmacology. Biomed. Rep., 2(1), 12-18.
- PN-A-04019:1998
- PN-EN-12147:2000

Adres do korespondencji: ggajdek@ur.edu.pl

ORCID: Józef Gorzelany 0000-0002-1028-097X
ORCID: Miłosz Zardzewiały 0000-0002-8843-2814
ORCID: Grażyna Gajdek 0000-0002-6565-1184

ZARZĄDZANIE ZŁOŻONOŚCIĄ ŁAŃCUCHÓW DOSTAW W WARUNKACH GEOPOLITYCZNEGO WĄSKIEGO GARDŁA: INNOWACJE ORGANIZACYJNE I LEKCJE KRYZYSU W CIEŚNINIE ORMUZ

Zofia Gródek-Szostak¹, Elżbieta Olech²

¹ Katedra Ekonomiki i Organizacji Przedsiębiorstw, Uniwersytet Ekonomiczny w Krakowie

² Katedra Inżynierii Produkcji Logistyki i Informatyki Stosowanej, Uniwersytet Rolniczy w Krakowie

Wprowadzenie

Wzrost intensywności i częstotliwości napięć geopolitycznych w ostatnich latach doprowadził do jakościowej zmiany charakteru ryzyka w globalnych łańcuchach dostaw. Coraz częściej ryzyko to nie ma charakteru punktowego ani sektorowego, lecz przyjmuje postać zagrożeń systemowych, wynikających z koncentracji przepływów towarowych i energetycznych w wąskich gardłach infrastruktury transportowej. Literatura przedmiotu określa te miejsca mianem morskich *chokepointów* – strategicznych przesmyków i korytarzy, przez które przechodzi znaczna część światowego handlu, przy jednoczesnym braku realnych alternatyw trasowych¹. Tego rodzaju koncentracja efektywności logistycznej powoduje kumulację podatności systemu na zakłócenia, które mogą być wywołane zarówno czynnikami naturalnymi, jak i działaniami o charakterze politycznym lub militarnym.

Badania empiryczne wskazują, że zakłócenia w wąskich gardłach transportowych prowadzą do efektów rozlewających się (*ripple effects*), obejmujących nie tylko rynki bezpośrednio powiązane z danym korytarzem, lecz także odległe gospodarki i sektory zależne od globalnych sieci dostaw². Geopolityczne wąskie gardła stają się w tym ujęciu źródłem ryzyka systemowego, ponieważ ingerują jednocześnie w poziom operacyjny (transport i dostępność), finansowy (koszty frachtu i ubezpieczeń) oraz instytucjonalny (swoboda żeglugi i niepewność regulacyjna). Jak podkreślają Bednarski i et al.³, tego rodzaju zakłócenia wymuszają przeprojektowanie dotychczasowych logik zarządzania łańcuchami dostaw, opartych na efektywności kosztowej i minimalizacji zapasów, na rzecz podejść adaptacyjnych i odpornościowych.

¹ Verschuur J., Lumma J., Hall J. W., Systemic impacts of disruptions at maritime chokepoints. *Nature Communications*, 16, 10421, 2025.

² Verschuur J., Lumma J., Hall J. W., Ibidem.

³ Bednarski Ł., Roscoe S., Blome C., Schleper, M. C., Geopolitical disruptions in global supply chains: A state-of-the-art literature review. *Production Planning & Control*, 36(4), 536–562, 2023.

Cieśnina Ormuz stanowi jedno z najważniejszych geopolitycznych wąskich gardeł współczesnej gospodarki światowej⁴. Jest ona kluczowym morskim korytarzem łączącym Zatokę Perską z rynkami globalnymi i odpowiada za znaczącą część światowego transportu ropy naftowej, skroplonego gazu ziemnego oraz innych strategicznych surowców i półproduktów⁵. Jej znaczenie wykracza jednak daleko poza sektor energetyczny, gdyż przez Ormuz przebiegają również łańcuchy dostaw nawozów, petrochemikaliów oraz surowców niezbędnych dla rolnictwa i przemysłu przetwórczego, co czyni ją krytycznym elementem globalnych sieci produkcyjnych.

Analizy oparte na podejściu systemowym pokazują, że zakłócenia żeglugi w Cieśninie Ormuz prowadzą do natychmiastowego wzrostu kosztów transportu i ubezpieczeń, wydłużenia tras alternatywnych oraz pogłębienia niepewności decyzyjnej przedsiębiorstw funkcjonujących w międzynarodowych łańcuchach dostaw^{6,7,8,9}. Co istotne, skutki te utrzymują się nawet w sytuacji częściowej normalizacji przepływów, ponieważ same oczekiwania ryzyka oraz zmiany warunków ubezpieczeniowych wpływają na trwale przeformułowanie strategii logistycznych i kontraktowych.

W literaturze podkreśla się, że Cieśnina Ormuz pełni funkcję punktu krytycznego nie tylko ze względu na skalę przepływów, lecz także z powodu braku równoważnych substytutów infrastrukturalnych. Oznacza to, że zdolność systemu globalnych łańcuchów dostaw do absorpcji zakłóceń w tym obszarze jest ograniczona, a adaptacja odbywa się kosztem wzrostu złożoności organizacyjnej, finansowej i koordynacyjnej całych sieci dostaw^{10,11}. Tym samym kryzys w Cieśninie Ormuz stanowi szczególnie trafny punkt odniesienia do analizy zarządzania złożonością łańcuchów dostaw w warunkach geopolitycznej niepewności.

Celem niniejszej pracy jest identyfikacja kluczowych wymiarów złożoności ujawniających się w sytuacji kryzysowej oraz określenie praktyk zarządczych umożliwiających utrzymanie funkcjonalności łańcuchów dostaw mimo ograniczeń infrastrukturalnych, finansowych i instytucjonalnych. W opracowaniu wykorzystano podejście

⁴ Gródek-Szostak Z., Olech E., Kornas R., Geopolityka jako element zarządzania inżynierią produkcji [W:] Dzieniszewski G. & Kuboń M. (red.), *Logistyka w inżynierii produkcji* : monografia (s. 57-66) Wydawnictwo Inżynieria Rolnicza, 2025.

⁵ Lassoued R., Maritime chokepoint insecurity and systemic trade vulnerability: A transportation security assessment of the Strait of Hormuz. *Journal of Transportation Security*, 19, Article 21, 2026.

⁶ Lassoued R., *ibidem*.

⁷ UNCTAD, Hormuz disruption shows why early-warning data matters. United Nations Conference on Trade and Development. <https://unctad.org/news/hormuz-disruption-shows-why-early-warning-data-matters> , 2026a

⁸ UNCTAD, Strait of Hormuz disruptions: Growth and financial implications. United Nations Conference on Trade and Development. https://unctad.org/system/files/official-document/osginf2026d2_en.pdf , 2026b.

⁹ Ziółko M., Niemczyk A., Gródek-Szostak Z., Hendel M. Ziółkowska N., *Tourism and Transport in the Sharing Economy: Strategies for Resource and Service Management*. (Routledge Studies in Central and Eastern European Business and Economics). Routledge, 2025.

¹⁰ Verschuur J., Lumma J., Hall J. W., *ibidem*.

¹¹ Stehle H., Huchzermeier A., Navigating geopolitical risks in global supply chains: A systematic literature review. *SSRN Electronic Journal*. https://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract_id=5161777 , 2025.

konceptyjne oparte na literaturze z zakresu zarządzania złożonością i odporności łańcuchów dostaw, uzupełnione analizą kryzysu w Cieśninie Ormuz jako empirycznego punktu odniesienia. Postawiono pytania badawcze:

1. W jakich wymiarach złożoność łańcuchów dostaw ulega intensyfikacji w warunkach geopolitycznego wąskiego gardła?
2. Jakie mechanizmy powodują rozlewanie się zakłóceń z poziomu infrastrukturalnego na poziom operacyjny i finansowy przedsiębiorstw?
3. Jakie decyzje zarządcze ograniczają negatywne skutki złożoności bez utraty zdolności adaptacyjnych łańcucha dostaw?

Metodyka badań

Praca oparta jest na podejściu koncepcyjno-analitycznym, łączącym pogłębioną analizę literatury przedmiotu z analitycznym studium zdarzenia krytycznego. Przyjęta metodyka umożliwia identyfikację mechanizmów systemowych oraz wzorców decyzyjnych ujawniających się w warunkach skrajnej niepewności i zakłóceń o charakterze geopolitycznym. Tego rodzaju podejście jest rekomendowane w badaniach nad zarządzaniem łańcuchami dostaw w sytuacjach, w których pełne badania empiryczne są utrudnione z uwagi na trwający charakter kryzysu oraz ograniczoną dostępność danych operacyjnych¹².

Metodycznie opracowanie osadzone jest w paradygmacie łańcuchów dostaw jako złożonych systemów adaptacyjnych, w których zakłócenia infrastrukturalne, finansowe i instytucjonalne generują nieliniowe efekty kaskadowe. Pozwala to na analizę nie tylko bezpośrednich skutków kryzysu, lecz także sposobów ich rozprzestrzeniania się w globalnych sieciach produkcji i dystrybucji¹³.

Jako empiryczny punkt odniesienia zastosowano kryzys w Cieśninie Ormuz, traktowany jako przykład geopolitycznego wąskiego gardła o kluczowym znaczeniu dla globalnych łańcuchów dostaw. Metodycznie nie jest to klasyczne studium przypadku pojedynczego przedsiębiorstwa, lecz analiza infrastrukturalno-systemowa, koncentrująca się na oddziaływaniu zakłóceń w korytarzu transportowym na wiele powiązanych sektorów i rynków jednocześnie. Takie ujęcie jest zgodne z postulatem integrowania badań nad bezpieczeństwem transportu, handlem międzynarodowym i zarządzaniem łańcuchami dostaw w analizach chokepointów morskich¹⁴.

Analiza obejmuje identyfikację:

- kluczowych strumieni przepływów towarowych zależnych od Cieśniny Ormuz,
- kanałów transmisji ryzyka (transport, koszty frachtu, ubezpieczenia, niepewność regulacyjna),
- skutków pośrednich ujawniających się w odległych ogniwach łańcuchów dostaw.

Dobór kryzysu w Cieśninie Ormuz jako kontekstu empirycznego oparto na celowym doborze przypadku krytycznego i ekstremalnego zgodnie z metodyką badań jakościowych i koncepcyjnych w naukach o zarządzaniu oraz badaniach nad łańcuchami do-

¹² Bednarski Ł., Roscoe S., Blome C., Schleper, M. C., *idibem*.

¹³ Verschuur J., Lumma J., Hall J. W., *ibidem*.

¹⁴ Lassoued R., *ibidem*.

staw. Tego rodzaju przypadki są szczególnie użyteczne w badaniach zorientowanych na teorię, gdyż umożliwiają obserwację mechanizmów systemowych w warunkach ich maksymalnej intensyfikacji¹⁵.

W rezultacie kryzys w Cieśninie Ormuz pełni w pracy funkcję empirycznej soczewki, przez którą analizowane są uniwersalne problemy zarządzania złożonością łańcuchów dostaw w warunkach geopolitycznej niestabilności.

Złożoność łańcuchów dostaw – ujęcie teoretyczne

Złożoność stanowi jedną z kluczowych, immanentnych cech współczesnych łańcuchów dostaw, wynikającą z ich globalnego zasięgu, wielopoziomowej struktury oraz intensywnej współzależności uczestników. W literaturze zarządzania łańcuchem dostaw złożoność definiowana jest najczęściej jako stopień, w jakim system obejmuje liczne, zróżnicowane elementy pozostające w relacjach nieliniowych, których łączne zachowanie nie daje się w prosty sposób wyprowadzić z zachowania poszczególnych części¹⁶. W ujęciu tym złożoność nie jest wyłącznie funkcją liczby podmiotów, lecz także intensywności ich interakcji, zmienności otoczenia oraz ograniczeń decyzyjnych występujących w warunkach niepełnej informacji.

Złożoność strukturalna odnosi się do architektury łańcucha dostaw, a więc konfiguracji jego węzłów i powiązań. Obejmuje ona liczbę i zróżnicowanie dostawców, odbiorców i pośredników, stopień geograficznego rozproszenia, długość łańcucha, a także gęstość relacji sieciowych między podmiotami. Badania wskazują, że wzrost złożoności strukturalnej zwiększa podatność systemu na zakłócenia, gdyż zaburzenie w jednym węźle może szybko przenieść się na inne ogniwa sieci¹⁷. Jednocześnie strukturalna redundancja, choć kosztowna, może pełnić funkcję bufora zwiększającego odporność systemu.

Złożoność dynamiczna wynika z czasowej zmienności procesów zachodzących w łańcuchach dostaw, takich jak wahania popytu i podaży, opóźnienia informacyjne, sprzężenia zwrotne oraz propagacja szoków. Charakterystyczną cechą tej postaci złożoności jest nieliniowość, przejawiająca się m.in. w efekcie byczego bicza, gdzie niewielkie zmiany popytu na końcu łańcucha prowadzą do znacznych fluktuacji produkcji i zapasów w jego wcześniejszych ogniwach. Złożoność dynamiczna powoduje, że skutki decyzji ujawniają się z opóźnieniem i w często nieprzewidywalny sposób, co znacząco utrudnia sterowanie systemem w warunkach turbulencji¹⁸.

Z kolei złożoność decyzyjna związana jest z wielością autonomicznych aktorów podejmujących decyzje na podstawie ograniczonej informacji, często zgodnie z odmiennymi celami i logikami instytucjonalnymi. W globalnych łańcuchach dostaw

¹⁵ Eisenhardt K. M., Building theories from case study research. *Academy of Management Review*, 14(4), 532–550, 1989.

¹⁶ Franke H., Chae S., Foerstl K., Toward a configurational understanding of global supply chain complexity. *Journal of Business Logistics*, 45, e12371, 2024.

¹⁷ Fernández Campos P., Huaccho Huatuco L., Trucco P., Framing the interplay mechanisms between structural and dynamic complexity in supply chains. *Production Planning Control*, 2022.

¹⁸ Ivanov D., Structural dynamics and resilience in supply chain risk management. Springer, 2018.

decyzje operacyjne, taktyczne i strategiczne podejmowane są w różnych skalach czasowych i organizacyjnych, co prowadzi do konfliktów celów, fragmentacji odpowiedzialności oraz wzrostu niepewności koordynacyjnej. Jak wskazują Abbasi i Varga¹⁹, złożoność decyzyjna nie może być w pełni zredukowana za pomocą centralnego planowania, lecz wymaga mechanizmów adaptacyjnych i zdolności uczenia się systemu jako całości.

W odpowiedzi na ograniczenia tradycyjnych, liniowych modeli zarządzania coraz częściej przyjmuje się perspektywę złożonych systemów adaptacyjnych (complex adaptive systems – CAS) jako ramę teoretyczną analizy łańcuchów dostaw. W ujęciu tym łańcuch dostaw postrzegany jest jako sieć autonomicznych, lecz współzależnych podmiotów, które poprzez lokalne interakcje generują emergentne wzorce zachowań na poziomie całego systemu^{20,21}. System taki charakteryzuje się zdolnością do samoorganizacji, współewolucji z otoczeniem oraz adaptacji do zmiennych warunków rynkowych i geopolitycznych.

Perspektywa CAS pozwala lepiej wyjaśnić, dlaczego próby ścisłej kontroli i optymalizacji łańcuchów dostaw często prowadzą do paradoksalnego wzrostu ich podatności na zakłócenia. Zamiast eliminować niepewność, nadmierne upraszczanie struktur i redukcja buforów zmniejszają zdolność systemu do absorpcji szoków. W tym kontekście zarządzanie łańcuchem dostaw polega nie na pełnej kontroli, lecz na „sterowaniu” systemem poprzez tworzenie warunków sprzyjających adaptacji, elastyczności i dywersyfikacji²².

Ujęcie łańcucha dostaw jako złożonego systemu adaptacyjnego stanowi zatem teoretyczny fundament do analizy kryzysów o charakterze systemowym, w tym zakłóceń wynikających z geopolitycznych wąskich gardeł. Pozwala ono integrować złożoność strukturalną, dynamiczną i decyzyjną w spójny model interpretacyjny, który lepiej odzwierciedla realia funkcjonowania globalnych sieci dostaw w warunkach wysokiej niepewności.

Kryzys w Cieśninie Ormuz jako kontekst empiryczny

Cieśnina Ormuz należy do najbardziej niewralgicznych morskich wąskich gardeł współczesnej gospodarki światowej, koncentrując kluczowe przepływy surowców energetycznych, petrochemikaliów oraz innych dóbr pośrednich o strategicznym znaczeniu dla globalnych łańcuchów dostaw. Kryzys wywołany eskalacją napięć geopolitycznych w regionie ujawnił, że zakłócenia w tym korytarzu transportowym nie mają wyłącznie charakteru operacyjnego, lecz przyjmują postać złożonego ryzyka systemowego. Analizy empiryczne wskazują, że destabilizacja żeglugi w Cieśninie Ormuz wpływa jednocześnie na niezawodność tras, ciągłość ładunków, koszty frachtu oraz warunki ubezpie-

¹⁹ Abbasi M., Varga L., Steering supply chains from a complex systems perspective. *European Journal of Management Studies*, 27(1), 5–38, 2022.

²⁰ Choi T. Y., Supply networks as a complex adaptive system. In *The Nature of Supply Networks* s. 204–249. Oxford University Press, 2023.

²¹ Tewari A., Wilding R., Supply chains as complex adaptive systems. In *Handbook of Theories for Purchasing, Supply Chain and Management Research* (pp. 399–411). Edward Elgar, 2022.

²² Abbasi M., Varga L., *ibidem*.

zeniowe, tworząc środowisko skrajnej niepewności decyzyjnej dla uczestników globalnych sieci logistycznych²³.

Cieśnina Ormuz spełnia kluczowe kryteria przypadku krytycznego, ponieważ stanowi wąskie gardło o wyjątkowo wysokiej koncentracji przepływów oraz ograniczonej substytucyjności infrastrukturalnej. Badania empiryczne nad morskimi chokepointami wskazują, że zakłócenia w takich lokalizacjach generują nieproporcjonalnie duże skutki gospodarcze w porównaniu z zakłóceniami o podobnej skali w innych częściach sieci transportowych²⁴. Oznacza to, że jeśli mechanizmy eskalacji ryzyka i efektu domina występują w systemie globalnym, to ich pełna materializacja jest najbardziej widoczna właśnie w tego typu punktach krytycznych. Z metodologicznego punktu widzenia analizowany kryzys został zakwalifikowany jako przypadek osadzony infrastrukturalnie, a nie jako klasyczne studium przypadku pojedynczej organizacji. Takie podejście jest rekomendowane w badaniach łańcuchów dostaw, gdy przedmiotem analizy są relacje sieciowe oraz zależności systemowe, wykraczające poza poziom pojedynczych firm²⁵. Pozwala ono uchwycić interakcje pomiędzy aktorami rynkowymi, instytucjami regulacyjnymi, rynkami finansowymi oraz infrastrukturą transportową w jednym ujęciu analitycznym.

Kryzys w Cieśninie Ormuz został ponadto dobrany jako przypadek diagnozujący granice odporności globalnych łańcuchów dostaw. Jak wskazują badania nad morskimi wąskimi gardłami, właśnie brak realnych tras alternatywnych powoduje, że zakłócenia nie mogą być w pełni skompensowane przez proste przekierowanie przepływów, lecz prowadzą do trwałego wzrostu kosztów, ryzyka i złożoności decyzyjnej^{26,27}. Tym samym przypadek ten umożliwia empiryczne prześledzenie przejścia od lokalnego zakłócenia logistycznego do globalnego szoku systemowego.

Zgodnie z logiką badań opartych na pojedynczym przypadku, celem analizy nie jest statystyczna generalizacja wyników, lecz uogólnienie analityczne, polegające na weryfikacji użyteczności przyjętych ram teoretycznych – w tym koncepcji złożonych systemów adaptacyjnych oraz wielowymiarowej złożoności łańcuchów dostaw – w wyjaśnianiu rzeczywistych procesów kryzysowych^{28,29}. Jeżeli zakładane mechanizmy (np. efekt domina, eskalacja ryzyka, niepewność instytucjonalna) ujawniają się w przypadku tak ekstremalnym jak Ormuz, zwiększa to ich trafność interpretacyjną również dla mniej dramatycznych, lecz strukturalnie podobnych zdarzeń w innych częściach globalnych sieci dostaw.

Jednym z pierwszych i najbardziej dotkliwych efektów kryzysu były gwałtowne spadki natężenia ruchu statków, wynikające zarówno z zagrożeń fizycznych, jak i decy-

²³ Lassoued R., *ibidem*.

²⁴ Verschuur J., Lumma J., Hall J. W., *ibidem*.

²⁵ Koulikoff-Souviron M., Harrison A., Using case study methods in researching supply chains. In *Research Methodologies in Supply Chain Management* s. 267–282, Springer, 2019.

²⁶ Lassoued R., *ibidem*.

²⁷ UNCTAD, Strait of Hormuz disruptions: Implications for global trade and development. United Nations Conference on Trade and Development. https://unctad.org/system/files/official-document/osgttinf2026d1_en.pdf, 2026.

²⁸ Eisenhardt K. M., *ibidem*.

²⁹ Ozcan P., Han S., Graebner M., Single cases: The what, why and how. In *The Routledge Companion to Qualitative Research in Organization Studies*. Routledge, 2017.

zji armatorów oraz ubezpieczycieli o ograniczeniu ekspozycji na ryzyko wojenne. Dane UNCTAD pokazują, że ruch morski w Cieśninie Ormuz uległ niemal całkowitemu załamaniu, a towarzyszył temu silny wzrost składek ubezpieczeń wojennych, kosztów frachtu oraz cen paliw okrętowych. W efekcie nawet krótkotrwałe przerwy w transzycie przełożyły się na istotne podwyższenie kosztów handlu międzynarodowego oraz spadek przewidywalności terminów dostaw³⁰. Równolegle z zakłóceniami infrastrukturalnymi narastała niepewność instytucjonalna, związana z ograniczoną przewidywalnością decyzji politycznych, zmiennością reżimów sankcyjnych oraz brakiem trwałych gwarancji swobody żeglugi. W literaturze podkreśla się, że niepewność ta działała jak mnożnik ryzyka, gdyż podmioty gospodarcze zmuszone były podejmować decyzje logistyczne w warunkach niedookreślonych zasad prawnych i finansowych, co dodatkowo ograniczało skłonność do utrzymywania przepływów w regionie^{31,32}.

Empiryczna dynamika kryzysu w Cieśninie Ormuz pokazuje, że zakłócenia początkowo postrzegane jako regionalne szybko przekształciły się w kryzys globalny, obejmujący wiele sektorów i obszarów geograficznych. Jak wskazują badania nad morskimi wąskimi gardłami, tego rodzaju przejście następuje w sytuacji, gdy koncentracja przepływów w jednym korytarzu nie posiada realnych substytutów infrastrukturalnych, a koszty obejść trasowych są znaczące i długotrwałe³³. W przypadku Cieśniny Ormuz skala zależności globalnej gospodarki od tego szlaku spowodowała, że wstrząsy transportowe niemal natychmiast przełożyły się na rynki energii, chemikaliów, nawozów oraz żywności.

Raporty UNCTAD dokumentują, że wzrost cen energii oraz kosztów transportu morskiego uruchomił kaskadę efektów wtórnych, obejmujących inflację kosztową, osłabienie walut w krajach importujących oraz pogorszenie warunków finansowania handlu, zwłaszcza w gospodarkach rozwijających się³⁴. Co istotne, empiryczne obserwacje wskazują, że nawet częściowe przywrócenie przepływów nie prowadziło do szybkiej stabilizacji sytuacji, gdyż zmienione warunki ubezpieczeń, podwyższone stawki frachtowe oraz ostrożność aktorów rynkowych utrzymywały podwyższony poziom kosztów i ryzyka.

Badania opublikowane w *Nature Communications* potwierdzają, że w przypadku tak krytycznych chokepointów skutki zakłóceń mają charakter nieliniowy i przestrzennie rozproszony – kraje oddalone geograficznie od regionu konfliktu doświadczają istotnych strat gospodarczych z powodu powiązań sieciowych w handlu międzynarodowym³⁵. Kryzys w Cieśninie Ormuz należy zatem interpretować nie jako odosobnione zdarzenie transportowe, lecz jako empiryczny przykład globalnego szoku systemowego,

³⁰ UNCTAD, Hormuz disruption shows why early-warning data matters. United Nations Conference on Trade and Development. <https://unctad.org/news/hormuz-disruption-shows-why-early-warning-data-matters>, 2026a.

³¹ Lassoued R., ibidem.

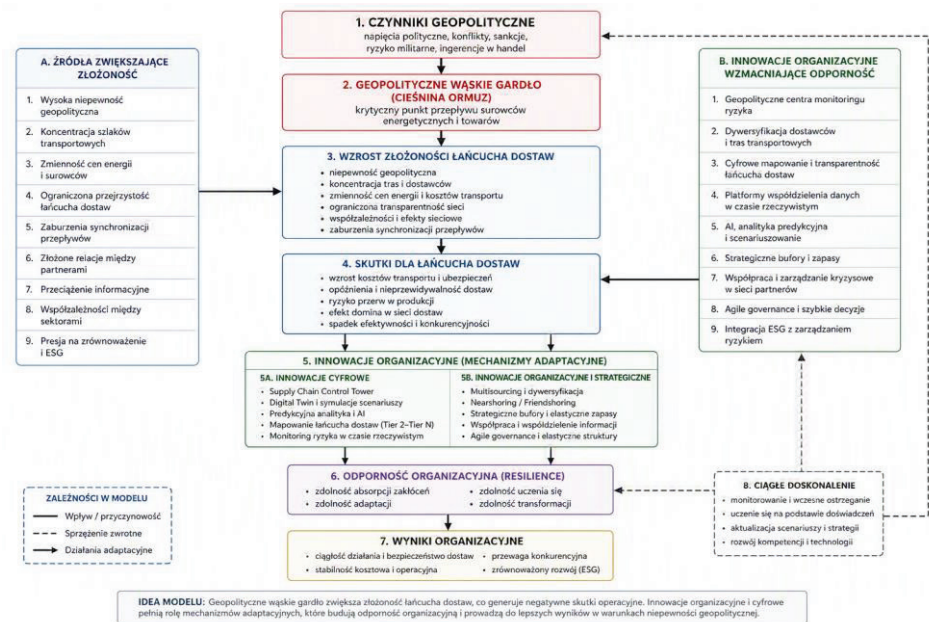
³² UN News, Chokepoints and conflict: How the Hormuz crisis is exposing global shipping vulnerabilities. <https://news.un.org/en/story/2026/04/116738>, 2026.

³³ Verschuur J., Lumma J., Hall J. W., ibidem.

³⁴ UNCTAD, Strait of Hormuz disruptions: Growth and financial implications. United Nations Conference on Trade and Development. https://unctad.org/system/files/official-document/osginf2026d2_en.pdf, 2026b.

³⁵ Verschuur J., Lumma J., Hall J. W., ibidem.

ujawniającego strukturalną kruchość i złożoność współczesnych łańcuchów dostaw. Koncepcyjny model wpływu geopolitycznych wąskich gardeł przedstawia rysunek 1.



Rysunek 1. Koncepcyjny model wpływu geopolitycznych wąskich gardeł na złożoność i odporność łańcuchów dostaw

Źródło: opracowanie własne

Rysunek przedstawia kompleksowy model zarządzania złożonością łańcuchów dostaw w warunkach występowania geopolitycznych wąskich gardeł, wykorzystując przykład Cieśniny Ormuz jako jednego z najważniejszych strategicznych punktów globalnej gospodarki. Schemat ukazuje zależności pomiędzy źródłami ryzyka geopolitycznego, konsekwencjami dla funkcjonowania łańcuchów dostaw oraz działaniami adaptacyjnymi podejmowanymi przez organizacje w celu zwiększenia odporności na zakłócenia.

Centralnym elementem modelu jest Cieśnina Ormuz, przez którą przebiega znaczna część światowego transportu ropy naftowej i gazu. Napięcia polityczne, konflikty militarne, sankcje gospodarcze czy potencjalne blokady żeglugowe mogą prowadzić do zakłóceń przepływu surowców i towarów, generując efekt domina obejmujący liczne sektory gospodarki. Powoduje to wzrost kosztów transportu i ubezpieczeń, opóźnienia dostaw, zaburzenia procesów produkcyjnych oraz zwiększenie niepewności w podejmowaniu decyzji biznesowych.

Po lewej stronie rysunku przedstawiono główne czynniki zwiększające złożoność zarządzania łańcuchami dostaw. Obejmują one wysoką niepewność geopolityczną, koncentrację szlaków transportowych, zmienność cen energii, ograniczoną przejrzystość sieci dostaw oraz rosnącą liczbę współzależności między uczestnikami globalnych ekosystemów gospodarczych. Czynniki te sprawiają, że tradycyjne modele zarządzania

oparte wyłącznie na efektywności kosztowej stają się niewystarczające w obliczu dynamicznych zmian otoczenia.

Po prawej stronie zaprezentowano innowacje organizacyjne, które mogą zwiększać odporność przedsiębiorstw na skutki geopolitycznych zakłóceń. Szczególne znaczenie odgrywają rozwiązania cyfrowe, takie jak mapowanie łańcuchów dostaw, platformy wymiany danych w czasie rzeczywistym, sztuczna inteligencja oraz analityka predykcyjna. Równocześnie istotne są działania strategiczne obejmujące dywersyfikację dostawców i tras transportowych, tworzenie zapasów strategicznych, rozwój współpracy międzyorganizacyjnej oraz wdrażanie podejścia agile governance umożliwiającego szybsze reagowanie na zmiany.

Dolna część schematu przedstawia proces przechodzenia „od porażki do odporności”, wskazując kolejne etapy budowania zdolności adaptacyjnych organizacji. Proces ten rozpoczyna się od identyfikacji źródeł złożoności i ryzyka, następnie obejmuje działania związane z prognozowaniem i planowaniem scenariuszowym, dywersyfikacją źródeł zaopatrzenia, wzmacnianiem współpracy w sieci partnerów oraz ciągłym doskonaleniem procesów organizacyjnych. Takie podejście wpisuje się w koncepcję resilience management, zgodnie z którą organizacje powinny nie tylko minimalizować skutki zakłóceń, ale również rozwijać zdolność do uczenia się i transformacji w odpowiedzi na nowe wyzwania.

Rysunek podkreśla, że skuteczne zarządzanie złożonością łańcuchów dostaw w warunkach geopolitycznych nie polega wyłącznie na ograniczaniu ryzyka, lecz na budowaniu systemowej odporności poprzez integrację technologii cyfrowych, innowacji organizacyjnych oraz strategicznego zarządzania relacjami w ramach całego ekosystemu dostaw. W rezultacie organizacje mogą osiągnąć większą stabilność operacyjną, szybszą reakcję na kryzysy oraz trwałą przewagę konkurencyjną w turbulentnym otoczeniu międzynarodowym.

Efekt domina i eskalacja ryzyka w sieciach dostaw

Efekt domina w sieciach dostaw odnosi się do procesu, w którym pierwotne zakłócenie, zamiast pozostać lokalne, rozprzestrzenia się wzdłuż i wszerz sieci, powodując wtórne i trzeciorzędne zakłócenia w innych jej częściach. W przeciwieństwie do klasycznego efektu byczego bicia, który dotyczy głównie fluktuacji popytu na poziomie operacyjnym, efekt domina obejmuje zmiany strukturalne i dynamiczne, prowadzące do trwałego obniżenia wydajności, dostępności i stabilności łańcucha dostaw³⁶.

Jednym z kluczowych mechanizmów rozprzestrzeniania się zakłóceń jest wysoka zależność sieciowa pomiędzy węzłami o kluczowym znaczeniu infrastrukturalnym. W przypadku morskich wąskich gardeł, takich jak Cieśnina Ormuz, zakłócenie tranzytu powoduje jednoczesne spiętrzenie ryzyka transportowego, finansowego i kontraktowego, które następnie przenosi się na kolejne ogniwa sieci – porty, centra dystrybucyjne, zakłady produkcyjne oraz rynki końcowe³⁷.

³⁶ Ivanov D., Dolgui A., Sokolov, B. (Eds.), *Handbook of ripple effects in the supply chain*. Springer, 2025.

³⁷ Verschuur J., Lumma J., Hall J. W., *ibidem*.

Tabela 1. Znaczenie Cieśniny Ormuz dla światowego handlu

Kategoria	Dane / statystyki	Znaczenie dla handlu światowego
Położenie i funkcja	Połączenie Zatoki Perskiej z Zatoką Omańską (Iran–Oman–ZEA)	Jedyna morska droga eksportu surowców energetycznych z regionu Zatoki Perskiej
Szerokość (najwęższe miejsce)	ok. 33–54 km	Wąskie „gardło” – łatwe do blokady, wysokie ryzyko geopolityczne
Przepływ ropy (wolumen)	ok. 20 mln baryłek dziennie (2024–2025)	Kluczowy kanał globalnych dostaw energii
Udział w globalnej konsumpcji ropy	ok. 20% światowego zużycia ropy	Co piąta baryłka ropy na świecie przechodzi przez Ormuz
Udział w morskim handlu ropą	ok. 25% światowego handlu morskiego ropą	Jeden z najważniejszych „chokepointów” energetycznych świata
Szacunkowy zakres udziału (różne źródła)	20–33% globalnego transportu morskiego ropy	Pokazuje skalę uzależnienia gospodarki światowej
Handel LNG	ok. 20% globalnego handlu LNG	Krytyczna rola dla bezpieczeństwa energetycznego (szczególnie Azji i Europy)
Znaczenie dla eksportu państw Zatoki	Główna trasa dla Arabii Saudyjskiej, Iraku, Kuwejtu, Iranu, Kataru	Brak alternatyw – wysokie uzależnienie od cieśniny
Struktura transportu (2026)	ropa 38%, LPG 29%, LNG 19%, paliwa rafinowane 19%, chemikalia 13%	Dominacja surowców energetycznych (handlowo strategiczny korytarz energii)
Znaczenie dla Azji	ok. 80% eksportowanej ropy trafia do Azji	Uzależnienie Chin, Indii, Japonii, Korei
Ruch statków (przed kryzysami)	ok. 100–130 statków dziennie	Wysoka intensywność ruchu handlowego
Możliwości obejścia (rurociągi)	tylko ok. 16–17% przepustowości może być zastąpione alternatywami	Brak realnych zamienników – wysoka wrażliwość systemu globalnego
Znaczenie strategiczne	największy na świecie „oil chokepoint”	Kluczowy element bezpieczeństwa energetycznego świata

Źródło: opracowanie własne na podstawie IEA, 2026, EIA, 2026

Kolejnym istotnym mechanizmem eskalacyjnym są opóźnienia czasowe i sprzężenia zwrotne, które powodują, że decyzje adaptacyjne podejmowane lokalnie (np. próby zabezpieczenia zapasów lub zmiany tras) generują niezamierzone skutki systemowe. Literatura wskazuje, że w warunkach kryzysu geopolitycznego takie reakcje mogą pro-

wadzić do nadmiernej konkurencji o ograniczone zasoby transportowe, wzrostu cen frachtu oraz pogłębienia niestabilności zamiast jej redukcji³⁸.

Empiryczne analizy wskazują, że skutki efektu domina w sieciach dostaw mają wyraźnie zróżnicowany charakter sektorowy, wynikający z odmiennej elastyczności technologicznej, substytucjonalności zasobów oraz intensywności powiązań z rynkami energii i transportu. Sektory silnie zależne od surowców energetycznych i chemicznych, takie jak energetyka, petrochemia czy nawozy, reagują na zakłócenia w wąskich gardłach niemal natychmiastowym wzrostem kosztów oraz ograniczeniem podaży³⁹. Z kolei sektor przetwórstwa i produkcji przemysłowej doświadcza skutków bardziej pośrednich, lecz długotrwałych, związanych z niedoborami komponentów, wydłużeniem czasów realizacji oraz presją na kapitał obrotowy. Analizy porównawcze pokazują, że branże o wysokiej koncentracji dostawców lub głębokiej specjalizacji technologicznej są szczególnie podatne na eskalację zakłóceń⁴⁰. Analizę wpływu kryzysu na złożoność zarządzania łańcuchami przedstawia tabela 2.

Tabela 2. Analiza wpływu kryzysu w Cieśninie Ormuz na złożoność zarządzania łańcuchami dostaw oraz możliwe innowacje organizacyjne

Wymiar analizy	Charakterystyka problemu	Wpływ na łańcuch dostaw	Wzrost złożoności zarządzania	Innowacje organizacyjne	Efekty adaptacyjne
Ryzyko geopolityczne	Napięcia militarne, sankcje, blokady morskie	Zakłócenie przepływu surowców i towarów	Wysoka niepewność decyzyjna	Geopolityczne centra monitoringu ryzyka (Geopolitical Risk Intelligence)	Szybsza reakcja na zagrożenia
Koncentracja szlaków transportowych	Silne uzależnienie od jednego korytarza logistycznego	Ryzyko przerwania dostaw	Wzrost zależności systemowej	Strategia multi-sourcingu i dywersyfikacji tras	Większa odporność sieci
Zmienność cen energii	Wahania cen ropy i gazu	Wzrost kosztów transportu i produkcji	Trudności planistyczne	Dynamiczne modele zakupowe i hedging	Stabilizacja kosztów
Ograniczona przejrzystość sieci dostaw	Niewystarczająca wiedza o dostawcach niższych rzędów	Trudności identyfikacji zagrożeń	Asymetria informacyjna	Cyfrowe mapowanie łańcucha dostaw (Supply Chain Mapping)	Większa transparentność

³⁸ Ivanov D., Dolgui A., Sokolov, B., ibidem.

³⁹ World Economic Forum, Beyond oil: 9 commodities impacted by the Strait of Hormuz crisis. <https://www.weforum.org/stories/2026/04/beyond-oil-9-commodities-impacted-closure-hormuz-strait/>, 2026.

⁴⁰ McKinsey & Company, Decoding disruption to reshape manufacturing footprints. <https://www.mckinsey.com/capabilities/operations/our-insights/decoding-disruption-to-reshape-manufacturing-footprints>, 2026.

Wymiar analizy	Charakterystyka problemu	Wpływ na łańcuch dostaw	Wzrost złożoności zarządzania	Innowacje organizacyjne	Efekty adaptacyjne
Synchronizacja przepływów	Opóźnienia transportowe i przeciążenia portów	Zaburzenia harmonogramów produkcyjnych	Wzrost kosztów koordynacji	Platformy współdzielenia danych w czasie rzeczywistym	Lepsza koordynacja uczestników
Zarządzanie zapasami	Niepewność terminów dostaw	Ryzyko niedoborów lub nadmiernych zapasów	Wzrost kosztów magazynowania	Inteligentne bufory strategiczne	Poprawa ciągłości działania
Relacje z partnerami	Rosnąca potrzeba współpracy międzyorganizacyjnej	Konieczność wspólnego zarządzania kryzysowego	Złożoność sieciowa	Collaborative Supply Chain Management	Wzmocnienie odporności ekosystemu
Transformacja cyfrowa	Konieczność szybkiej identyfikacji zakłóceń	Potrzeba danych w czasie rzeczywistym	Przeciążenie informacyjne	AI, Digital Twin, Predictive Analytics	Lepsze prognozowanie i scenariusze
Odporność organizacyjna	Powtarzalność szoków geopolitycznych	Konieczność adaptacji strukturalnej	Zarządzanie wieloma scenariuszami ryzyka	Organizational Resilience Framework	Zwiększenie zdolności adaptacyjnych
Zrównoważenie i ESG	Zmiana tras transportowych i źródeł zaopatrzenia	Potencjalny wzrost śladu węglowego	Konflikt między efektywnością a bezpieczeństwem	Integracja ESG z zarządzaniem ryzykiem	Długookresowa odporność strategiczna

Źródło: opracowanie własne

Przedstawiona analiza wskazuje, że kryzys w Cieśninie Ormuz stanowi przykład geopolitycznego wąskiego gardła, którego skutki wykraczają daleko poza bezpośrednie zakłócenia transportowe. Ograniczenie przepływu surowców energetycznych oraz wzrost niepewności geopolitycznej prowadzą do zwiększenia złożoności zarządzania łańcuchami dostaw na poziomie operacyjnym, taktycznym i strategicznym. Złożoność ta wynika przede wszystkim z wysokiego stopnia współzależności uczestników globalnych sieci dostaw, asymetrii informacji oraz trudności w przewidywaniu dynamiki zdarzeń geopolitycznych.

Tabela 2 pokazuje, że tradycyjne podejście skoncentrowane na efektywności kosztowej okazuje się niewystarczające w warunkach narastającej niepewności. Coraz większego znaczenia nabierają innowacje organizacyjne oparte na cyfryzacji, współpracy sieciowej oraz zarządzaniu ryzykiem w czasie rzeczywistym. W tym kontekście odporność (resilience) staje się nie tylko zdolnością do odbudowy po zakłóceniu, ale również umiejętnością adaptacji i transformacji organizacyjnej. Kryzys w Cieśninie Ormuz ujawnia zatem potrzebę przejścia od logiki optymalizacji do logiki adaptacyjności i strategicznej elastyczności.

Najpoważniejsze konsekwencje społeczne ujawniają się jednak w sektorach powiązanych z bezpieczeństwem żywnościowym, gdzie zakłócenia w dostawach energii i nawozów przekładają się z opóźnieniem na wzrost cen żywności i ryzyko niedoborów, zwłaszcza w gospodarkach importozależnych⁴¹.

W warunkach kryzysu geopolitycznego skuteczne zarządzanie złożonością łańcuchów dostaw wymaga redefinicji architektury decyzyjnej, w szczególności odejścia od silnie scentralizowanych, liniowych modeli planowania. Literatura podkreśla, że ograniczona widoczność wielopoziomowych sieci dostaw jest jednym z głównych czynników intensyfikujących efekt domina, gdyż uniemożliwia szybkie rozpoznanie źródeł zakłóceń oraz ocenę ich potencjalnych skutków⁴².

Rozwój narzędzi cyfrowych, w tym systemów monitorowania w czasie rzeczywistym i cyfrowych bliźniaków łańcucha dostaw, umożliwia zwiększenie transparentności decyzji oraz lepszą koordynację reakcji adaptacyjnych. Badania wskazują, że wysoka widoczność przepływów materiałowych, informacyjnych i finansowych stanowi warunek konieczny do ograniczania eskalacji kryzysów o charakterze systemowym⁴³. Ograniczanie skutków geopolitycznych wąskich gardeł wymaga jednak zastosowania komplementarnego zestawu rozwiązań technologicznych, organizacyjnych i strategicznych. Ich charakterystykę, poziom oddziaływania oraz potencjalny wpływ na odporność łańcucha dostaw przedstawiono w tabeli 3.

Tabela 3. Macierz innowacji organizacyjnych zwiększających odporność na geopolityczne wąskie gardła

Innowacja organizacyjna	Cel wdrożenia	Poziom oddziaływania	Wpływ na odporność łańcucha dostaw
Supply Chain Control Tower	Centralizacja informacji	Operacyjny	Wysoki
Digital Twin Supply Chain	Symulacja scenariuszy zakłóceń	Taktyczny/Strategiczny	Bardzo wysoki
Multisourcing	Ograniczenie zależności od jednego dostawcy	Strategiczny	Wysoki
Nearshoring/Friendshoring	Skrócenie łańcucha dostaw	Strategiczny	Wysoki
Platformy współdzielenia danych	Poprawa koordynacji partnerów	Operacyjny	Średni–wysoki
Predictive Analytics	Wczesne wykrywanie zagrożeń	Operacyjny	Wysoki
Strategic Foresight	Antycypacja zmian geopolitycznych	Strategiczny	Bardzo wysoki
Agile Governance	Przyspieszenie procesów decyzyjnych	Organizacyjny	Wysoki

Źródło: opracowanie własne

⁴¹ Masoura M., The fragile link: Supply chain disruptions and global food security. *Food Science and Technology*, 38(3), 36–39, 2024.

⁴² Hosseini Shekarabi S. A., Mavi R. K., Macau F. R., Supply chain resilience: A critical review of risk mitigation, robust optimisation, and technological solutions. *Global Journal of Flexible Systems Management*, 26, 681–735, 2025.

⁴³ Ivanov D., Dolgui A., Sokolov, B., *ibidem*.

Macierz innowacji organizacyjnych przedstawia zestaw rozwiązań wspierających budowę odporności łańcuchów dostaw w warunkach rosnącej niepewności geopolitycznej. Wspólną cechą tych innowacji jest ich orientacja na zwiększenie widoczności procesów, szybkości podejmowania decyzji oraz zdolności do adaptacji w obliczu nagłych zakłóceń. Technologie cyfrowe, takie jak Digital Twin, Predictive Analytics czy Supply Chain Control Tower, umożliwiają bieżące monitorowanie sytuacji oraz modelowanie alternatywnych scenariuszy działania.

Jednocześnie tabela 3 podkreśla, że skuteczne zarządzanie geopolitycznymi wąskimi gardłami nie może opierać się wyłącznie na rozwiązaniach technologicznych. Równie istotne są innowacje związane z architekturą organizacyjną i zarządzaniem relacjami między partnerami, w tym multisourcing, nearshoring, friendshoring czy agile governance. Oznacza to, że odporność łańcucha dostaw jest rezultatem synergii między innowacjami technologicznymi, organizacyjnymi i strategicznymi. W perspektywie długookresowej organizacje zdolne do integrowania tych elementów uzyskują przewagę konkurencyjną wynikającą nie tylko z efektywności, lecz przede wszystkim z umiejętności funkcjonowania w warunkach wysokiej złożoności i niepewności otoczenia.

Klasyczne strategie, takie jak dywersyfikacja źródeł zaopatrzenia czy tworzenie buforów zapasów, zyskują w warunkach geopolitycznej niepewności nowy wymiar. Literatura podkreśla jednak, że ich skuteczność zależy od zdolności systemu do dynamicznej rekonfiguracji, a nie jedynie statycznego zwiększania redundancji⁴⁴.

Empiryczne analizy wskazują, że przedsiębiorstwa, które traktują bufory jako element elastycznej architektury sieci, a nie jako kosztowy dodatek, lepiej radzą sobie z zakłóceniami krytycznych korytarzy transportowych. Rekonfiguracja sieci obejmuje nie tylko zmianę tras lub dostawców, lecz także adaptację wolumenów, kontraktów oraz relacji partnerskich w skali mezo- i makroekonomicznej⁴⁵.

Na podstawie przeprowadzonej analizy przypadku możliwe jest sformułowanie syntetycznych wniosków zarządczych odnoszących się do słabości globalnych sieci dostaw oraz działań zwiększających ich zdolności adaptacyjne. Zestawienie najważniejszych lekcji wynikających z kryzysu w Cieśninie Ormuz przedstawiono w tabeli 4.

Tabela 4. Lekcje kryzysu w Cieśninie Ormuz dla zarządzania złożonością łańcuchów dostaw

Obserwacja z kryzysu	Ujawniona słabość systemu	Wniosek zarządczy	Rekomendowane działania
Utrudnienia żeglugi w regionie Zatoki Perskiej	Nadmierna koncentracja przepływów	Należy ograniczać zależność od pojedynczych punktów krytycznych	Dywersyfikacja dostawców i tras
Skokowe wzrosty kosztów frachtu i ubezpieczeń	Niska elastyczność kosztowa	Potrzebne są modele adaptacyjne	Dynamiczne zarządzanie kontraktami
Opóźnienia dostaw surowców energetycznych	Brak alternatywnych źródeł zaopatrzenia	Konieczna redundancja zasobów	Strategiczne rezerwy i nearshoring

⁴⁴ Ivanov D., Dolgui A., Sokolov, B., ibidem.

⁴⁵ McKinsey & Company, ibidem.

Obserwacja z kryzysu	Ujawniona słabość systemu	Wniosek zarządczy	Rekomendowane działania
Ograniczona widoczność sieci dostaw	Niepełna identyfikacja ryzyka	Potrzeba pełnej transparentności	Cyfrowe bliźniaki i monitoring Tier 2–Tier N
Przenoszenie skutków kryzysu między sektorami	Silne współzależności systemowe	Ryzyko ma charakter sieciowy	Zarządzanie ekosystemowe
Trudności w prognozowaniu rozwoju sytuacji	Nieprzewidywalność środowiska	Planowanie oparte na scenariuszach	Foresight strategiczny i stress testy

Źródło: opracowanie własne

Analiza doświadczeń związanych z kryzysami w Cieśninie Ormuz pozwala zidentyfikować kluczowe słabości współczesnych globalnych łańcuchów dostaw. Szczególnie widoczna jest nadmierna koncentracja przepływów logistycznych w punktach krytycznych oraz wysoki poziom zależności od ograniczonej liczby dostawców i tras transportowych. W konsekwencji nawet lokalny konflikt lub okresowe ograniczenie żeglugi może generować globalne skutki dla bezpieczeństwa energetycznego, produkcji przemysłowej i stabilności cen.

Wnioski zarządcze płynące z kryzysu wskazują, że organizacje powinny rozwijać zdolności antycypacyjne oraz mechanizmy zwiększające elastyczność systemową. Oznacza to odejście od liniowego postrzegania ryzyka na rzecz podejścia sieciowego, uwzględniającego efekt domina i kaskadowe rozprzestrzenianie się zakłóceń. Szczególnego znaczenia nabierają rozwiązania takie jak dywersyfikacja źródeł zaopatrzenia, budowa zapasów strategicznych, cyfrowa transparentność sieci dostaw oraz wykorzystanie foresightu strategicznego. Lekcje płynące z kryzysu w Cieśninie Ormuz mogą stanowić cenne źródło wiedzy dla organizacji przygotowujących się na przyszłe turbulencje geopolityczne.

Podsumowanie

W pracy wyjaśniono, w jaki sposób geopolityczne wąskie gardła – na przykładzie kryzysu w Cieśninie Ormuz – wpływają na intensyfikację złożoności globalnych łańcuchów dostaw, eskalację ryzyka systemowego oraz wybory decyzyjne przedsiębiorstw. Zastosowane podejście koncepcyjno-analityczne, oparte na perspektywie złożonych systemów adaptacyjnych oraz analizie przypadku krytycznego, umożliwiło identyfikację mechanizmów, które przekształcają lokalne zakłócenia infrastrukturalne w kryzysy o zasięgu globalnym. Wnioski płynące z analizy nie mają charakteru wyłącznie deskryptywnego, lecz wnoszą wkład do dyskusji teoretycznej nad zarządzaniem złożonością i odpornością łańcuchów dostaw w warunkach geopolitycznej niestabilności.

Przeprowadzona analiza wskazuje, że w warunkach geopolitycznego wąskiego gardła złożoność łańcuchów dostaw ulega jednoczesnemu wzmocnieniu w trzech wzajemnie powiązanych wymiarach: strukturalnym, dynamicznym i decyzyjnym. Złożoność

strukturalna intensyfikuje się na skutek koncentracji krytycznych przepływów w ograniczonej liczbie węzłów infrastrukturalnych oraz braku łatwych substytutów trasowych. Kryzys w Cieśninie Ormuz ujawnił, że taka koncentracja prowadzi do nadwrażliwości systemu na zakłócenia, nawet jeśli ich źródło ma charakter regionalny.

Złożoność dynamiczna wzrasta wraz z pojawieniem się nieliniowych efektów czasowych, takich jak opóźnienia w dostawach, kumulacja niedoborów oraz gwałtowne zmiany cen i kosztów. Skutki zakłóceń nie są rozłożone równomiernie w czasie, lecz ujawniają się falami, co utrudnia prognozowanie i planowanie. Z kolei złożoność decyzyjna pogłębia się w wyniku wzrostu niepewności instytucjonalnej, presji czasowej oraz rozbieżnych logik decyzyjnych aktorów funkcjonujących na różnych poziomach i w różnych jurysdykcjach. Tym samym geopolityczne wąskie gardło działa jak katalizator, który ujawnia latentną kruchość i wzajemne zależności globalnych sieci dostaw.

Analiza empiryczna potwierdza, że kluczowym mechanizmem eskalacji zakłóceń jest efekt domina, rozumiany jako propagacja zakłóceń poprzez gęsto powiązane sieci dostaw. W przypadku krytycznych węzłów infrastrukturalnych zakłócenie transportowe inicjuje kaskadę efektów wtórnych, obejmujących opóźnienia operacyjne, spadek dostępności surowców i komponentów oraz wzrost kosztów logistycznych i ubezpieczeniowych. Mechanizm ten jest wzmacniany przez sprzężenia zwrotne, w których lokalne decyzje adaptacyjne – takie jak zwiększanie zapasów, zmiany tras czy renegocjacje kontraktów – prowadzą do dalszego wzrostu niestabilności systemowej.

Rozlewanie się zakłóceń na poziom finansowy następuje poprzez wzrost kosztów frachtu, energii, finansowania zapasów oraz przez obniżenie płynności przedsiębiorstw. Decyzje logistyczne zaczynają bezpośrednio oddziaływać na wynik finansowy, strukturę kapitału obrotowego oraz ryzyko kredytowe. W tym sensie zakłócenia infrastrukturalne nie są neutralne finansowo, lecz przekształcają się w wielowymiarowy szok, oddziałujący równocześnie na operacje i finanse przedsiębiorstw, a w dalszej kolejności na całe sektory i gospodarkę.

Wyniki analizy wskazują, że skuteczne ograniczanie negatywnych skutków złożoności wymaga odejścia od prób jej redukcji za wszelką cenę na rzecz zarządzania złożonością w sposób adaptacyjny. Kluczową rolę odgrywa tu architektura decyzyjna oparta na zwiększonej widoczności łańcucha dostaw, obejmującej zarówno przepływy materialne, jak i finansowe. Wysoki poziom transparentności umożliwia wcześniejsze rozpoznanie punktów krytycznych oraz koordynację decyzji w skali całej sieci, a nie jedynie pojedynczych organizacji.

Istotne znaczenie mają również decyzje dotyczące dywersyfikacji źródeł zaopatrzenia i tras transportowych oraz utrzymywania buforów w sposób selektywny i dynamiczny. Analiza pokazuje, że bufor i redundancja są efektywne jedynie wtedy, gdy stanowią element możliwości rekonfiguracji sieci, a nie statyczne zabezpieczenie zwiększające koszty. Wreszcie, kluczowym czynnikiem ograniczającym eskalację ryzyka jest integracja decyzji logistycznych i finansowych. Traktowanie tych decyzji w sposób silosowy prowadzi do krótkowzrocznych działań, które zwiększają podatność na dalsze zakłócenia, podczas gdy podejście zintegrowane pozwala równoważyć koszty, ryzyko i zdolności adaptacyjne w dłuższym horyzoncie.

Kryzys w Cieśninie Ormuz pokazuje, że geopolityczne wąskie gardła nie stanowią jedynie zewnętrznych zdarzeń zakłócających funkcjonowanie łańcuchów dostaw, lecz ujawniają ich strukturalną złożoność i systemową kruchość. Złożoność ta nie jest zjawi-

skiem, które można jednoznacznie wyeliminować – jest ona immanentną cechą globalnych sieci dostaw. Kluczowym wyzwaniem dla zarządzania jest zatem nie redukcja złożoności, lecz rozwijanie zdolności do jej świadomego kształtowania w warunkach niepewności. W tym sensie artykuł wnosi wkład do teorii i praktyki zarządzania, wskazując, że odporność łańcuchów dostaw w erze geopolitycznej niestabilności zależy przede wszystkim od jakości architektury decyzyjnej, integracji perspektyw oraz zdolności do adaptacyjnej rekonfiguracji sieci.

Jednym z kluczowych wniosków płynących z badań nad kryzysami geopolitycznymi jest potrzeba ścisłej integracji decyzji logistycznych i finansowych. Wzrost kosztów frachtu, ubezpieczeń i finansowania zapasów powoduje, że decyzje czysto operacyjne mają bezpośrednie konsekwencje dla płynności i rentowności przedsiębiorstw. Analizy systemowe pokazują, że brak tej integracji prowadzi do krótkowzrocznych reakcji, które pogłębiają efekt domina zamiast go ograniczać.⁴⁶ Zarządzanie złożonością w warunkach kryzysu geopolitycznego wymaga zatem podejścia holistycznego, w którym logistyka, finanse i zarządzanie ryzykiem są traktowane jako współzależne elementy jednego systemu decyzyjnego.

Bibliografia

- Abbasi M., Varga L., Steering supply chains from a complex systems perspective. *European Journal of Management Studies*, 27(1), 5–38, 2022.
- Bednarski L., Roscoe S., Blome C., Schleper, M. C., Geopolitical disruptions in global supply chains: A state-of-the-art literature review. *Production Planning & Control*, 36(4), 536–562, 2023.
- Choi T. Y., Supply networks as a complex adaptive system. In *The Nature of Supply Networks* s. 204–249. Oxford University Press, 2023.
- Eisenhardt K. M., Building theories from case study research. *Academy of Management Review*, 14(4), 532–550, 1989.
- Fernández Campos P., Huaccho Huatuco L., Trucco P., Framing the interplay mechanisms between structural and dynamic complexity in supply chains. *Production Planning Control*, 2022.
- Franke H., Chae S., Foerstl K., Toward a configurational understanding of global supply chain complexity. *Journal of Business Logistics*, 45, e12371, 2024.
- Gródek-Szostak Z., Olech E., Kornas R., Geopolityka jako element zarządzania inżynierią produkcji [W:] *Dziesiętowski G. & Kuboń M. (red.), Logistyka w inżynierii produkcji : monografia* (s. 57–66) Wydawnictwo Inżynieria Rolnicza, 2025.
- Hosseini Shekarabi S. A., Mavi R. K., Macau F. R., Supply chain resilience: A critical review of risk mitigation, robust optimisation, and technological solutions. *Global Journal of Flexible Systems Management*, 26, 681–735, 2025.
- Ivanov D., Structural dynamics and resilience in supply chain risk management. Springer, 2018.
- Ivanov D., Dolgui A., Sokolov, B. (Eds.), *Handbook of ripple effects in the supply chain*. Springer, 2025.

⁴⁶ Hosseini Shekarabi S. A., Mavi R. K., Macau F. R., Supply chain resilience: A critical review of risk mitigation, robust optimisation, and technological solutions. *Global Journal of Flexible Systems Management*, 26, 681–735, 2025.

- Koulikoff-Souvion M., Harrison A., Using case study methods in researching supply chains. In *Research Methodologies in Supply Chain Management* s. 267–282, Springer, 2019.
- Lassoued R., Maritime chokepoint insecurity and systemic trade vulnerability: A transportation security assessment of the Strait of Hormuz. *Journal of Transportation Security*, 19, Article 21, 2026.
- Masoura M., The fragile link: Supply chain disruptions and global food security. *Food Science and Technology*, 38(3), 36–39, 2024.
- McKinsey & Company, Decoding disruption to reshape manufacturing footprints. <https://www.mckinsey.com/capabilities/operations/our-insights/decoding-disruption-to-reshape-manufacturing-footprints> , 2026.
- Ozcan P., Han S., Graebner M., Single cases: The what, why and how. In *The Routledge Companion to Qualitative Research in Organization Studies*. Routledge, 2017.
- Stehle H., Huchzermeier A., Navigating geopolitical risks in global supply chains: A systematic literature review. *SSRN Electronic Journal*. https://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract_id=5161777 , 2025.
- Tewari A., Wilding R., Supply chains as complex adaptive systems. In *Handbook of Theories for Purchasing, Supply Chain and Management Research* (pp. 399–411). Edward Elgar, 2022.
- UNCTAD, Hormuz disruption shows why early-warning data matters. United Nations Conference on Trade and Development. <https://unctad.org/news/hormuz-disruption-shows-why-early-warning-data-matters> , 2026a
- UNCTAD, Strait of Hormuz disruptions: Growth and financial implications. United Nations Conference on Trade and Development. https://unctad.org/system/files/official-document/osginf2026d2_en.pdf , 2026b.
- UNCTAD, Strait of Hormuz disruptions: Implications for global trade and development. United Nations Conference on Trade and Development. https://unctad.org/system/files/official-document/osgttinf2026d1_en.pdf , 2026.
- Verschuur J., Lumma J., Hall J. W., Systemic impacts of disruptions at maritime chokepoints. *Nature Communications*, 16, 10421, 2025.
- World Economic Forum, Beyond oil: 9 commodities impacted by the Strait of Hormuz crisis. <https://www.weforum.org/stories/2026/04/beyond-oil-Ing-commodities-impacted-closure-hormuz-strait/> , 2026.
- Ziółko M., Niemczyk A., Gródek-Szostak Z., Hendel M. Ziółkowska N., *Tourism and Transport in the Sharing Economy: Strategies for Resource and Service Management*. (Routledge Studies in Central and Eastern European Business and Economics). Routledge, 2025.

Adres do korespondencji: grodekz@uek.krakow.pl

ORCID: Zofia Gródek-Szostak 0000-0001-6283-6952

ORCID: Elżbieta Olech 0000-0003-4405-701X

INNOWACYJNE ROZWIĄZANIE OGŁAWIACZA DO ZBIORU SELER KORZENIOWEGO

Krzysztof K. Jadwisieńczyk¹, Dariusz J. Choszcz¹, Joanna Majkowska-Gadomska²,
K. Krupiński²

¹ Katedra Pojazdów i Maszyn, Uniwersytet Warmińsko-Mazurski w Olsztynie,
ul. Oczapowskiego 11, 10–719 Olsztyn

² Katedra Agrokosystemów i Ogrodnictwa, Uniwersytet Warmińsko-Mazurski
w Olsztynie, Plac Łódzki 3, 10–719 Olsztyn

Wstęp

Rosnące koszty produkcji, między innymi: paliwa oraz środków produkcji, a w tym przede wszystkim pracy ludzkiej oraz coraz bardziej ograniczone jej zasoby, wymuszają na gospodarstwach warzywniczych poszukiwania bardziej efektywnych metod organizacji zbioru. Seler korzeniowy należy do upraw szczególnie wymagających, charakteryzuje go pracochłonny i wieloetapowy zbiór. Jest bardzo wrażliwy na terminowość wykonania poszczególnych operacji. W warunkach utrzymujących się na zbliżonym poziomie cen sprzedaży, poprawa efektywności ekonomicznej staje się kluczowym czynnikiem decydującym o opłacalności produkcji¹.

Istotną rolę odgrywa tutaj właściwe zaplanowanie procesów logistycznych, obejmujących zarówno organizację pracy ludzi i maszyn, jak i transport surowca z pola oraz jego wstępne przygotowanie do sprzedaży lub przechowywania. Coraz częściej stosowane rozwiązania polegają na łączeniu operacji technologicznych w jednym przejeździe, wykorzystaniu istniejącego parku maszynowego oraz stopniowej mechanizacji prac, co pozwala ograniczyć nakłady pracy ręcznej i zwiększyć wydajność. Właściwie dobrane rozwiązania logistyczne mogą nie tylko usprawnić przebieg zbioru, ale także ograniczyć straty jakościowe i ilościowe plonu².

W niniejszej pracy przedstawiono wybrane aspekty organizacji zbioru selera korzeniowego z uwzględnieniem nowoczesnych rozwiązań logistycznych, które mogą być wdrażane zarówno w dużych, jak i mniejszych gospodarstwach.

¹ Weselek, A.; Bauerle, A.; Zikeli, S.; Lewandowski, I.; Högy, P. Effects on Crop Development, Yields and Chemical Composition of Celeriac (*Apium graveolens* L. var. *rapaceum*) Cultivated Underneath an Agrivoltaic system. *Agronomy* 11, pp. 733. DOI: <https://doi.org/10.3390/agronomy11040733>, 2021.

² Metodyka integrowana produkcja selera korzeniowego. 2023. PIORIN

Ogólna charakterystyka surowca

Seler korzeniowy (*Apiumgraveolens* var. *rapaceum*) jest warzywem należącym do rodziny selerowatych (*Apiaceae*), cenionym zarówno ze względu na walory smakowe, jak i wysoką wartość odżywczą. Jego częścią użytkową jest zgrubiały korzeń spichrzowy o nieregularnym kształcie, pokryty licznymi korzeniami bocznymi. Miąższ selera jest biały, aromatyczny i bogaty w witaminy (zwłaszcza witaminę C oraz witaminy z grupy B), składniki mineralne oraz związki bioaktywne^{3,4,5}.

Z punktu widzenia produkcji zbiorów selera korzeniowego stanowi surowiec wymagający szczególnych wymagań. Roślina ta charakteryzuje się długim okresem wegetacji, wynoszącym zazwyczaj od 140 do 180 dni, oraz wysokimi wymaganiami glebowymi i wodnymi. Najlepsze plony uzyskuje się na glebach żyznych, próchnicznych i dobrze uwilgotnionych. Jednocześnie korzenie są wrażliwe na uszkodzenia mechaniczne, co ma istotne znaczenie podczas zbioru, transportu i przechowywania^{6,7,8}.

Istotną cechą selera jako surowca jest jego niejednorodność pod względem wielkości i kształtu korzeni, co utrudnia pełną mechanizację zbioru oraz sortowania. Dodatkowo silnie rozwinięta nać oraz system korzeni bocznych wymagają przeprowadzenia zabiegów takich jak ogławianie i oczyszczanie, które często są czasochłonne i angażują pracę ręczną. Z punktu widzenia logistyki ważna jest także stosunkowo duża masa jednostkowa korzeni oraz ich podatność na utratę jakości w wyniku niewłaściwego obchodzenia się z plonem⁹.

W obecnym czasie brak jest rozwiązań konstrukcyjnych maszyn pozwalających na automatyzację procesu związanego z jednoczesnym ogławianiem części spichrzowej selera i jego wykopaniem za jednym przejazdem ciągnika, które mogłyby być wykorzystywane w gospodarstwach o powierzchni do 20 ha, z reguły wyposażonych w ciągniki i maszyny do zbioru okopowych starszej generacji (rys. 1).

³ Kołota E. Warzywnictwo. Wyd. UP Wrocław. 2007.

⁴ Abd D.H., Obiadalla E., Ali, Eldin A., Helaly A.A., Obiadalla-Ali H.A., & Glala A.A. (2011). Yield and Quality of Celeriac (*Apium graveolens* var. *gapaceum* M.) As Affected by Harvesting Dates and Cultivars.

⁵ Bruznican S, De Clercq H, Eeckhaut T, Van Huylenbroeck J and Geelen D (2020) Celery and Celeriac: A Critical View on Present and Future Breeding. *Front. Plant Sci.* 10:1699. DOI: 10.3389/fpls.2019.01699

⁶ Siwek P.; Domagała-Świątkiewicz, I.; Bucki, P.; Komorowska, M.; Gil, J. Yield and quality of new celeriac (*Apium graveolens* var. *rapaceum*) cultivars in organic field management. *ISHS Acta Horticulturae* 1264: II International Symposium on Carrot and Other Apiaceae. 2019.10.17660/ActaHortic.2019.1264.35

⁷ Lim T.K. *Apium graveolens* var. *rapaceum*. In *Edible Medicinal and Non Medicinal Plants: Volume 9, Modified Stems, Roots, Bulbs*; Lim, T.K., Ed.; Springer: Dordrecht, The Netherlands, pp. 367–373. ISBN 978-94-017-9511-1, 2015.

⁸ Stephens J.M. "Celeriac—*Apium Graveolens* L. var. *Rapaceum* (Mill.) Gaud. Beup.: HS576 MV043, 5 2003". *EDIS* (5). Gainesville, FL. Doi: <https://doi.org/10.32473/edis-mv043-1994>, 2003.

⁹ Sammel, A.; Niedźwiecki, E. Wpływ nawożenia mineralnego na plonowanie selera korzeniowego (*Apium graveolens* L. var. *rapaceum* (MILL.) GAUD.) odmiany prinz, uprawianego na glebach murszastych. 2006. Zeszyty Problemowe Postępów Nauk Rolniczych 2006 z. 512: 475-482



Rysunek 1. Widok obecnie najczęściej stosowanych technologii zbioru selera korzeniowego:
a - ciągnik + kombajn ziemniaczany Bolko, b - ciągnik + kombajn ziemniaczany Anna,
c - ciągnik + kopaczka elewatorowa

Źródło: Opracowanie własne

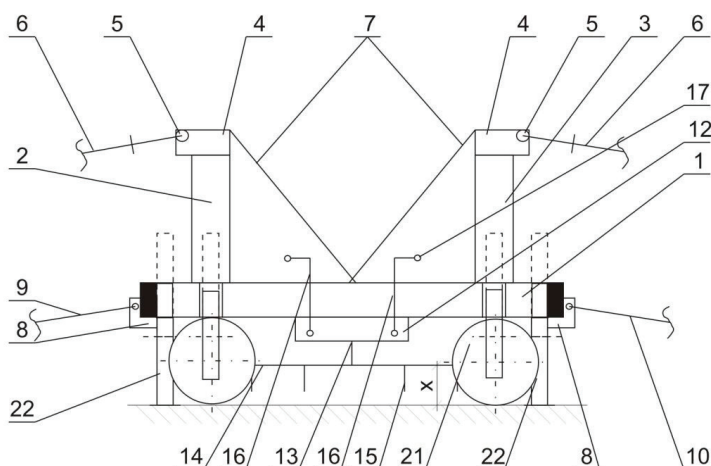
W zaistniałej sytuacji w ramach realizowanych przez pracowników Uniwersytetu Warmińsko-Mazurskiego w Olsztynie prac B+R, opracowano innowacyjne rozwiązanie ogławiacza do liści selera korzeniowego, który w pełni pozwala na kompleksowe i elastyczne podejście do zbiorów w zależności od typu ciągnika.

W przypadku ciągników starszej generacji urządzenie montowane z tyłu na trójpunktowym układzie zawieszenia umożliwia najpierw ogławianie roślin, co sprawia, że zbiór odbywa się minimum w dwóch etapach, z kolei w nowoczesnych ciągnikach, dzięki mocowaniu na przednim TUZ-ie, ogławianie i zbiór mogą odbywać się za jednym przejazdem agregatu.

Takie rozwiązanie sprawia, że jeden sprzęt może obsłużyć gospodarstwa, niezależnie od wieku i typu posiadanych ciągników, jednocześnie optymalizując czas i koszty zbioru.

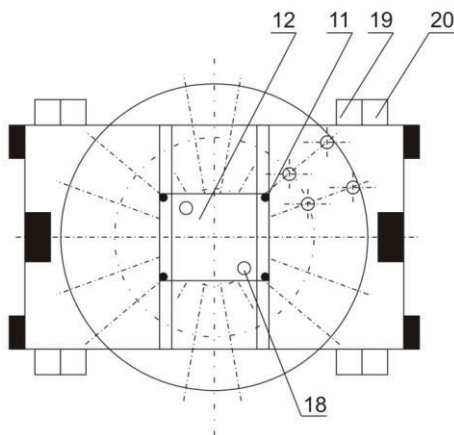
Koncepcja zaprojektowanego ogławiacza

Ogławiacz (rys. 2 i 3) składa się z sztywnej ramy nośnej, wyposażonej od przodu i od tyłu w słupice zakończone profilem zaczepu górnego z centralnym otworem mocowania łącznika górnego. Dla wzmocnienia i ustabilizowania konstrukcji obie słupice dodatkowo połączone listwami usztywniającymi. U dołu obu słupic symetrycznie po prawej i lewej ich stronie rozlokowano dwa zaczepy do łączenia ogławiacza z ciągnami dolnymi ciągnika z jego tyłu lub TUZ z przodu, stanowiące jednocześnie z górnym łącznikiem uniwersalny trójpunktowy układ zawieszenia ciągnika. Do ramy od dołu za pomocą czterech śrub mocujących zamontowano silnik hydrauliczny na którego wale osadzono koło robocze z gumowymi palcami. Silnik hydrauliczny połączono przewodami zakończonymi szybkozłączami do łączenia ich z gniazdami hydrauliki zewnętrznej ciągnika oraz z gniazdami w silniku hydraulicznym. W narożnikach ramy głównej z przodu jak i z tyłu przyspawano uchwyty do mocowania odpowiednio kół kopiujących i przesuwnych podpór zapewniających stabilność ogławiacza po odłączeniu go od ciągnika.



Rysunek 2. Schemat ogławiacza w widoku z boku: 1 – sztywna rama nośna, 2 i 3 – słupice, 4 – profil zaczepu górnego, 5 – centralny otwór mocowania, 6 – łącznik górny, 7 – listwy usztywniające, 8 – dwa dolne zaczepy, 9 – ciągną dolne ciągnika, 10 – TUZ, 13 – wał koła roboczego, 14 – koło robocze, 15 – gumowe palce robocze, 16 – przewody hydrauliczne, 17 – szybko złącza, 21 – koło kopiujące, 22 – podpora zapewniająca stabilność ogławiacza po odłączeniu go od ciągnika

Źródło: Opracowanie własne



Rysunek 3. Schemat ogławiacza w widoku z góry: 11 – śruba mocująca silnik hydrauliczny, 12 – silnik hydrauliczny, 18 – gniazda hydrauliki zewnętrznej silnika, 19 i 20 – uchwyty do mocowania kół kopiujących

Źródło: Opracowanie własne

Po dokonaniu obsługi codziennej związanej z określeniem stanu technicznego poszczególnych elementów roboczych ogławiacza (mocowanie gumowych palców na obrotowym talerzu), zawieszeniu ogławiacza na trójpunktowym układzie zawieszenia ciągnika z tyłu lub TUZ z przodu, podłączeniu szybkozłączy do hydrauliki zewnętrznej ciągnika oraz dokonaniu ewentualnych czynności związanych z konserwacją i regulacjami (wypoziomowanie wzdłużne i poprzeczne), ustawienie na odpowiednią wysokość kół kopiujących, wyjęciu podpór, ogławiacz jest gotowy do pracy¹⁰. Widok ogławiacza zawieszonego na przednim TUZ ciągnika współpracującego z kombajnem do ziemniaków Grimme przedstawiono na rysunku 4.



Rysunek 4. Widok prototypu ogławiacza zawieszonego na przednim TUZ-ie ciągnika współpracującego z kombajnem do ziemniaków Grimme

Źródło: Opracowanie własne

¹⁰ Buller P. BHP w indywidualnych gospodarstwach rolnych -lista kontrolna z komentarzem. Państwowa Inspekcja Pracy, 2025.

Podsumowanie

Zaproponowany ogławiacz stanowi specjalistyczne urządzenie rolnicze przeznaczone do mechanicznego oddzielenia części nadziemnej (naci) od korzenia selera w procesie ich zbioru. Konstrukcja maszyny umożliwia jej agregatowanie zarówno z przednim (TUZ), jak i tylnym trzypunktowym układem zawieszenia ciągnika, co istotnie zwiększa uniwersalność oraz zakres zastosowań w gospodarstwach.

Zawieszenie na przednim TUZ-ie pozwala na jednoczesną współpracę ogławiacza z kombajnem zbierającym korzenie, pracującym podczas tego przejazdu roboczego. Takie rozwiązanie prowadzi do integracji operacji technologicznej, redukcji liczby przejazdów po polu co ogranicza ugniatanie gleby. Jednocześnie wpływa to na zwiększenie wydajności pracy oraz optymalizację zużycia paliwa i czasu.

Alternatywna możliwość montażu urządzenia na podnośniku z tyłu ciągnika pozwala na jego wykorzystanie w bardziej konwencjonalnych układach pracy w gospodarstwach zróżnicowanym parku maszynowym. Ogławiacz cechuje się regulowanymi elementami roboczymi, co umożliwia dostosowanie parametrów pracy do warunków polowych oraz zmienności morfologicznej roślin. W rezultacie zapewnia wysoką precyzję ogławiania przy jednoczesnej minimalizacji strat surowca oraz uszkodzeń korzeni.

Bibliografia

- Abd D.H., Obiadalla E., Ali,Eldin A., Helaly A.A., Obiadalla-Ali H.A., & Glala A.A. Yield and Quality of Celeriac (*Apium graveolens* var. *rapaceum* M.) As Affected by Harvesting Dates and Cultivars, 2011.
- Bruznican S, De Clercq H, Eeckhaut T, Van Huylenbroeck J and Geelen D (2020) Celery and Celeriac: A Critical View on Present and Future Breeding. *Front. Plant Sci.* 10:1699. DOI: 10.3389/fpls.2019.01699.
- Buller P. BHP w indywidualnych gospodarstwach rolnych -lista kontrolna z komentarzem. Państwowa Inspekcja Pracy, 2025.
- Jadwisieńczyk K., Anders A., Choszcz D., Perz K. Ogławiacz do naci selera Pat.248568 2025.
- Kołota E. Warzywnictwo. Wyd. UP Wrocław, 2007.
- Lim T.K. *Apium graveolens* var. *rapaceum*. In *Edible Medicinal and Non Medicinal Plants: Volume 9, Modified Stems, Roots, Bulbs*; Lim, T.K., Ed.; Springer: Dordrecht, The Netherlands, pp. 367–373. ISBN 978-94-017-9511-1, 2015.
- Metodyka integrowana produkcja selera korzeniowego. PIORIN, 2023.
- Sammel, A.; Niedźwiecki, E. Wpływ nawożenia mineralnego na plonowanie selera korzeniowego (*Apium graveolens* L. var. *rapaceum* (MILL.) GAUD.) odmiany prinż, uprawianego na glebach murszastych. *Zeszyty Problemowe Postępów Nauk Rolniczych*, z. 512 475-482, 2006..

- Siwek P.; Domagała-Świątkiewicz I.; Bucki P.; Komorowska M.; Gil, J. Yield and quality of new celeriac (*Apium graveolens* var. *rapaceum*) cultivars in organic field management. ISHS Acta Horticulturae 1264: II International Symposium on Carrot and Other Apiaceae. 2019.10.17660/ActaHortic.2019.1264.35.
- Stephens J.M. 2003. "Celeriac–*Apium Graveolens* L. var. *Rapaceum* (Mill.) Gaud. Beaup.: HS576 MV043, 5 2003". *EDIS* 2003 (5). Gainesville, FL. DOI: <https://doi.org/10.32473/edis-mv043-1994>.
- Weselek A.; Bauerle A.; Zikeli S.; Lewandowski I.; Högy P. Effects on Crop Development, Yields and Chemical Composition of Celeriac (*Apium graveolens* L. var. *rapaceum*) Cultivated Underneath an Agrivoltaic System. *Agronomy*, 11, 733. DOI: <https://doi.org/10.3390/agronomy11040733>, 2021.

Adres do korespondencji: e-mail: krzychj@uwm.edu.pl

ORCID Krzysztof K. Jadwisieńczyk 0000-0001-7804-7675
ORCID Dariusz J. Choszcz 0000-0002-3119-9038
ORCID Joanna Majkowska-Gadomska 0000-0003-1693-0248

WPLYW NAWOZOWYCH PRODUKTÓW MIKROBIOLOGICZNYCH NA ROZWÓJ KORZENI CEBULI ORAZ SKUTECZNOŚĆ PRZYJMOWANIA SKŁADNIKÓW ODŻYWCZYCH

Maryna Khaskhachyk¹

¹ P.W. Lechpol sp. z o.o. ul. Jana Pawła II 36 89-200 Szubin

Wprowadzenie

Ostatnie dziesięciolecia charakteryzują się zwiększoną częstotliwością występowania abiotycznych czynników stresogennych w uprawach, w tym długotrwałych susz, ekstremalnych temperatur, podwyższonego zasolenia gleb oraz niedobór składników mineralnych, co prowadzi do znacznego zaburzenia procesów fizjologicznych, obniżenia potencjału adaptacyjnego i w konsekwencji, znacznego spadku plonów większości upraw w różnych strefach agroklimatycznych, zarówno na poziomie lokalnym, jak i globalnym. Niedobór wody zmniejsza potencjał wodny gleby prowadzący do odwodnienia komórek i wzrostu aktywnych form tlenu (AFT), co ostatecznie wywołuje stresy wtórne, takie jak stres osmotyczny i oksydacyjny, hamujące wzrost roślin. Niedobór wody prowadzi do zamknięcia aparatów szparkowych, obniżenia ciśnienia turgorowego, zawartości chlorofilu i fotosyntezy¹.

Rola mikroorganizmów w walce ze stresem

Szczególnie aktualna jest koncepcja mikrobiologicznie indukowanej tolerancji roślin na stres (Microbially Induced Stress Tolerance, MIST), która opisuje mechanizmy zwiększające odporność roślin na stresy abiotyczne, takie jak susza, zasolenie i ekstremalne temperatury. Mechanizmy te obejmują modyfikację równowagi fitohormonalnej, wzmocnienie ochrony antyoksydacyjnej, gromadzenie osmo-protektorów, produkcję egzopolisacharydów i glomaliny, a także aktywację genów odpowiedzialnych za reakcję na stres². Wzajemne oddziaływanie mikroorganizmów z roślinami uprawnymi ma kluczowe znaczenie dla adaptacji i przetrwania obu stron w każdym środowisku abiotycznym³. Społeczności mikroorganizmów, takich jak grzyby mikoryzowe arbuskularne

¹ Gill S. S., Tuteja N. Reactive oxygen species and antioxidant machinery in abiotic stress tolerance in crop plants. *Plant Physiol. Biochem.*, Vol. 48. P. 909–930, 2010.

² Kaushal M. Microbes in cahoots with plants: MIST to hit the jackpot of agricultural productivity during drought. *Int J Mol Sci.*, Vol. 20 (7), e1769, 2019.

³ Meena K. K., Sorty A. M., Bitla U. M. et al. Abiotic stress responses and microbe-mediated mitigation in plants: The omics strategies. *Frontiers in Plant Science*, Vol. 8, 2017.

(AMF)⁴ oraz bakterie ryzo-stymulujące wzrost roślin (PGPR)⁵, współpracują z roślinami w celu zwiększenia wydajności upraw w warunkach suszy za pomocą MIST.

Liczne badania wykazały również, że mikroorganizmy ryzosferyczne, w szczególności AMF, *Rhizobium* spp., PGPB oraz PSB/PSF, mają istotny wpływ na odżywianie, wzrost i odporność roślin na stres, wzbogacając mikrobiom i zwiększając dostępność składników odżywczych^{6,7,8}. Ich interakcja z systemem korzeniowym poprawia odżywianie fosforem, hamuje fitopatogeny i sprzyja tworzeniu efektywnej struktury zbiorowisk mikrobiologicznych^{9,10}. Wszystko to zwiększa wydajność upraw, zwłaszcza w warunkach stresowych.

Inokulacja grzybami AMF i bakteriami ryzobowymi wykazuje silny efekt agronomiczny¹¹, zapewniając wzrost wydajności i lepsze przyswajanie składników odżywczych. Jednak skuteczność takich biointerwencji znacznie wzrasta w połączeniu z fitohormonami – kluczowymi regulatorami adaptacji do stresu abiotycznego. Fitohormony koordynują molekularne i fizjologiczne reakcje roślin na niedobór wilgoci, w szczególności poprzez regulację programów genetycznych, modyfikację architektury korzeniowej oraz indukcję syntezy metabolitów obronnych, co w połączeniu z działaniem grzybów z rodzaju AMF i ryzobów tworzy spójny, zrównoważony ekologicznie system odżywiania biologicznego^{12,13}. Takie działanie odpowiada koncepcji zrównoważonego

⁴ Czajka T. O. Mikoryza – skuteczne biotechnologie w uprawie roślin. Problemy i osiągnięcia współczesnej biotechnologii: V Międzynarodowa konferencja naukowo-praktyczna (Charków, 28 marca 2025 r.). Charków: Narodowy Uniwersytet Farmaceutyczny, 2025.

⁵ Etesami H., Maheshwari D. K. Use of plant growth promoting rhizobacteria (PGPRs) with multiple plant growth promoting traits in stress agriculture: Action mechanisms and future prospects. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, Vol. 156. P. 225–246, 2018.

⁶ Igiehon N. O., Babalola O. O., Cheseto X., Torto B. Effects of rhizobia and arbuscular mycorrhizal fungi on yield, size distribution and fatty acid of soybean seeds grown under drought stress. *Microbiol Res*, Vol. 242, e126640, 2021.

⁷ Xie X. G., Zhang F. M., Yang T. et al. Endophytic fungus drives nodulation and N₂ fixation attributable to specific root exudates. *mBio*, Vol. 10 (4), e00728–19, 2019.

⁸ Zhang J. E., Feng L. F., Ouyang Y. et al. Phosphate-solubilizing bacteria and fungi in relation to phosphorus availability under different land uses for some latosols from Guangdong, China.

CATENA, Vol. 195, e104686, 2020.

⁹ Zhang C., van der Heijden M. G. A., Dodds B. K. et al. A tripartite bacterial-fungal-plant symbiosis in the mycorrhiza-shaped microbiome drives plant growth and mycorrhization. *Microbiome*, Vol. 12 (1), e13, 2024.

¹⁰ Trivedi P., Leach J. E., Tringe S. G. et al. Plant-microbiome interactions: from community assembly to plant health. *Nat Rev Microbiol*, Vol. 18. P. 607–21, 2020.

¹¹ Czajka T. O., Liaszenko V. V., Chomenko B. S. Wpływ inokulacji nasion na plon soi w uprawie ekologicznej. *Tawrijski Biuletyn Naukowy. Seria Nauki Rolnicze*, Nr 133. S. 180–187, 2023.

¹² Liao Z., Chen B., Boubakri H. et al. The regulatory role of phytohormones in plant drought tolerance. *Planta*, Vol. 261, e98, 2025.

¹³ Shaukat S., Mustafa G., Cheng K. Phytohormones for combating global challenges: an ecofriendly approach. In M. Faizan, S. Hayat (Eds), *Plant growth regulators: resilience for sustainable agriculture*. Springer Singapore, 2024.

rozwoju rolnictwa i określa wartość trójskładnikowej interakcji (AMF – ryzobia – fitohormony) w celu zwiększenia potencjału adaptacyjnego rośliny

Koncepcja MIST kształtuje się jako perspektywiczna strategia biologizacji rolnictwa, ukierunkowana na wzmocnienie odporności roślin na stres poprzez wykorzystanie pożytecznych mikroorganizmów. Grzyby mikoryzowe typu arbuskularnego, bakterie ryzobowe oraz mikroorganizmy mobilizujące fosfor wywierają wieloczynnikowy wpływ na organizm roślinny, aktywując fizjologiczno-biochemiczne i molekularne mechanizmy adaptacji do niekorzystnych warunków środowiskowych. Zastosowanie trójskładnikowych preparatów biologicznych, łączących grzyby mikoryzowe, ryzobie i stymulatory fitohormonalne, wykazują wysoką skuteczność w zwiększaniu potencjału adaptacyjnego upraw, dzięki synergii między czynnikami biologicznymi.

Rola mikroorganizmów w glebie

Gleba stanowi system bio-organiczno-mineralny, który zapewnia wzrost roślin uprawnych. Jednym z głównych czynników procesu tworzenia gleb jest mikroflora glebowa, której zawartość w 1 g, według danych E.M. Myszustina¹⁴, sięga miliardów komórek. Mikroflora ta charakteryzuje się niezwykle wysoką różnorodnością składu gatunkowego. Według R. Teata¹⁵ w 1 g gleby znajduje się około 4000 gatunków mikroorganizmów. Jednak większość z nich nie jest w stanie rosnąć na pożywkach, które są obecnie wykorzystywane do hodowli mikroorganizmów. Ich naturalnym środowiskiem życia może być organizm człowieka lub zwierzęcia, ekosystemy wodne lub morskie, źródła termalne, produkty spożywcze itp.¹⁶. Należy zauważyć, że liczba komórek hodowlanych w glebie może się zmieniać w zależności od etapu sukcesji ekosystemu¹⁷ i według danych, stosunek komórek hodowlanych do ich całkowitej liczby w ryzosferze zmniejszał się z 0,25 do 0,05 w ciągu pierwszych 30–50 dni uprawy roślin. Łączna masa organizmów prokariotycznych na Ziemi odpowiada w przybliżeniu biomase eukariotów¹⁸.

Wśród mikroflory gleby występują przedstawiciele niemal wszystkich gatunków mikroorganizmów opisanych w kluczu Bergey’a Bakterie i grzyby są najpowszechniejszymi i ekologicznie najważniejszymi fitosymbiontami¹⁹. Liczebność mikroorganizmów w glebie (wskaźnik biogeniczności gleby) zmienia się nie tylko w ciągu roku, ale także w krótkich odstępach czasu, w zależności od temperatury, wilgotności, stanu pokrywy roślinnej itp. Na przykład w regionach południowych na glebach nienawadnianych

¹⁴ Mishustin E.N. Mikroorganizmy a wydajność rolnictwa – Moskwa: Nauka, 1972.

¹⁵ Tate R.L. Soil microbial diversity research whither to now / Tate R.L. // Soil Sci, Vol. 162, № 9. – P. 605-606, 1997.

¹⁶ Dobrowolska T.G. Różnorodność bakteryjna gleb: ocena metod, możliwości, perspektyw / T.G. Dobrowolska, L.V. Lysak, G.M. Zenova, D.G. Zvyagintsev // Mikrobiol. T. 70, nr 2. – s. 149–167, 2021.

¹⁷ Garland J.L. Culturability as an indicator of succession in microbial communities / Garland J.L., Cook K.L., Adams J.L., Kerkhof L. // Microbiol. Ecol. – 2001. – Vol. 42, № 2. – P. 150-158

¹⁸ Umarow M.M. Asocjacyjna fiksacja azotu. – Moskwa: MSU, 1986. – 136 s.

¹⁹ Rosario de Filipe Anton Ma. Interacciones microorganismo suelo-planta en la preservación del Medio Ambiente y la Salud / Rosario de Filipe Anton Ma // An. Real acad. nac. farm. – 2004. – Vol. 70, № 3. – P. 743-776

w letnim okresie suszy dominują promieniowce, a wiosną i jesienią – bakterie, których liczebność latem znacznie spada. Nawilżenie gleby ma zauważalny wpływ na stan cenozy mikrobiologicznej w takich strefach. Z reguły aktywizacja mikroflory glebowej następuje wiosną¹⁴.

Funkcjonowanie mikroflory glebowej jest jednym z ważnych czynników sprzyjających strukturyzacji gleby. Na przykład, rozwijające się na powierzchni cząstek gleby, grzyby i promieniowce otaczają te cząstki grzybnią i tworzą agregaty wodoodporne, które w kolejnym etapie mogą być spajane przez humus^{20,21}. Pewną rolę w tym procesie odgrywają mikroorganizmy syntetyzujące polisacharydy pozakomórkowe²², które powodują transformację resztek roślinnych w glebie i tworzenie humusu. Mikroorganizmy są niezwykle ważnym czynnikiem kształtującym żyzność gleby. Skład ilościowy i proporcje poszczególnych przedstawicieli w mikroflorze gleby w znacznym stopniu zależą od sposobu uprawy gleby²³ oraz wprowadzania do gleby resztek roślinnych. Znaczny wpływ na rozprzestrzenianie się w glebie poszczególnych grup mikroorganizmów mają wydzieliny korzeniowe roślin^{24,25}. Zgodnie z danymi [80] wydzieliny korzeniowe stanowią około 20% całkowitej ilości produktów fotosyntezy roślin²⁶. W skład wydzielin korzeniowych wchodzi węglowodany, kwasy organiczne, aminokwasy, peptydy, alkaloidy, glikozydy, witaminy, substancje fenolowe itp. Wykazano, że skład eksometabolitów korzeniowych zależy od warunków i stadium rozwoju roślin.²⁶ Udział kwasu szczawiowego, jabłkowego i mlekowego wyniósł odpowiednio 5,7, 15,3 i 10,0% całkowitej ilości kwasów organicznych²⁵. Skład ilościowy i jakościowy wydzielin korzeniowych oraz różne potrzeby troficzne mikroorganizmów mają znaczący wpływ na wzrost w strefie korzeniowej przedstawicieli mikroflory różnych grup taksonomicznych, a także na ich aktywność antagonistyczną. Wiadomo, że skład mikroflory ryzosfe-

²⁰ Kudzin J.K. Nawozy bakteryjne. – Kijów: Derzhsilgospvydav URSR, 1962. – 108 s

²¹ Oades J.M. The role of biology in the formation, stabilization and degradation of soil structure. - *Geoderma*. – 1993. – № 56. – P. 377- 400

²² 22. Lynch J.M. Promotion and inhibition of soils aggregate stabilization by microorganisms /Lynch J.M. //J. Gen. Microbiol. – 1981. – № 126. – P. 371- 373

²³ Szewczenko I.P. Wpływ metod uprawy i nawożenia na stan cenozy mikrobiologicznego oraz właściwości fitotoksyczne typowej gleby czarnoziemowej erodowanej / Szewczenko I.P., Drach J.O., Jatsenko S.V. //Biuletyn Nauk Rolniczych. – 2006. – nr 10. – s. 12–15

²⁴ Golovko E.A. Mikroorganizmy w allelopatii roślin wyższych. – K.: Naukova Dumka, 1984. – 197 s.

²⁵ Kravchenko L.V. Wydzieliny korzeniowe pomidorów i ich wpływ na wzrost oraz aktywność przeciwgrzybiczą szczepów *Pseudomonas* /Kravchenko L.V., Azarova T.S., Leonova-Erko E.I.

i in. //Microbiol. – 2003. – T. 72, nr 1. – S. 48–53

²⁶ Davey M.E. Microbial biofilms: from ecology to molecular genetics /Davey M.E., O'Toole G.A. //Microbiol. and Molecular Biol. Reviews. – 2000. – Vol. 64, № 4. – P. 847-867

ry różnych roślin znacznie się różni. Co więcej, różnice te są istotne, jeśli porównać cenozy mikrobiologiczne objętości gleby i ryzosfery²⁷.

Mikroorganizmy glebowe są w stanie wydzielać substancje stymulujące wzrost i rozwój fitobiontów. Synteza przez nie w strefie korzeniowej witamin (tiaminy, witaminy B12, pirydoksyny, ryboflawiny, kwasu pantotenowego itp.), a także fitohormonów (giberelin, heteroauksyn i innych), wywiera pozytywny wpływ na rozwój roślin^{28,29}. Tak więc, skład mikroflory glebowej oraz zawartość w niej zarówno mikroorganizmów pożytecznych, jak i fitopatogennych oraz fitotoksycznych dla roślin uprawnych zależy od szeregu czynników: gatunku uprawianej rośliny, sposobu uprawy gleby oraz jej właściwości fizykochemicznych³⁰.

Obrót azotu w glebie

Ponad dwie trzecie zapotrzebowania roślin na azot pokrywane jest przez azot pochodzenia biologicznego³¹. Udział azotu pochodzenia biologicznego w plonach wynosi od 60 do 90 %. Łączna roczna produkcja azotu w ekosystemach sięga 175–190 mln ton. Dla porównania można powiedzieć, że tylko około 5% azotu z tej ilości było wytwarzane przez zakłady na całym świecie pod koniec XX wieku w postaci nawozów azotowych³². Według danych B.W. Simarowa i współautorów³³ na naszej planecie mikroorganizmy wiążą rocznie co najmniej 200 mln ton azotu cząsteczkowego, z czego około 90 mln. ton – na obszarach uprawnych.

Aktywnością pobierania azotu charakteryzują się przedstawiciele bakterii z rodzaju *Clostridium*, mikroorganizmy z rodzajów *Clostridium*, *Azotobacter*, *Azospirillum*, *Pseudomonas*, *Acetobacter*, *Alcaligenes*, *Agrobacterium*, *Erwinia*, *Klebsiella*, *Bacillus* oraz innych bakterii^{34,35,36,37,38,39,40}.

²⁷ Kuske C.R. Diverse uncultivated bacterial groups from soils of the arid southwestern United States that are present in many geographic regions /Kuske C.R., Barus S.M. and Buchs J.D. //Appl. Environ. Microbiol. – 1997. № 63.– P. 3614-3621.

²⁸ Titowa L.V. Wpływ materiałów o wysokiej dyspersji na aktywność fizjologiczną bakterii z rodzaju *Azotobacter* / Titowa L.V., Antypczuk A.F., Kurdysz I.K. i in. //Mikrobiol. czasopismo. – 1994. – T. 56, nr 3. – S. 60–65.

²⁹ Czernowa L.S. *Azotobacter vinelandii* IMV B-7076 – perspektywny producent substancji biologicznie czynnych dla uprawy roślin / Czernowa L.S., Kurdysz I.K. //Materiały IV Międzynarodowej konferencji naukowej „Regulacja wzrostu, rozwoju i wydajności roślin” (Mińsk, 26–28.10.2005). – Mińsk, 2005. – S. 243

³⁰ Patika V.P., Tichonowicz I.A., Filipiew I.D. i in. //Mikroorganizmy i rolnictwo alternatywne. – K.: Urozhaj, 1993.– 173 s

³¹ Umarow M.M. Mikrobiologiczna transformacja azotu w glebie /M.M. Umarow, A.W. Kurakow, A.L. Stepanow. – Moskwa: GEOS, 2007. – 137 s

³² Babiewa I.P. Biologia gleb / I.P. Babiewa, G.M. Zenowa. – Moskwa: Wydawnictwo Uniwersytetu Moskiewskiego, 1989. – 335 s.

³³ B.W. Simarowa L (pod red) Genetyczne podstawy selekcji bakterii brodawkowych /Pod red.: Leningradskie VO Agropromizdat, 1990. – S. 192. 24

³⁴ Patyka V.P., Kots S.J., Volkogon V.V. i in .Azot biologiczny – Kijów: Svit, 2003. – s. 422.

. W agrocenozach z uprawami zbóż ważną rolę odgrywają bakterie z rodzaju *Azospirillum*. Wykazano, że w ciągu roku w różnych typach gleb mikroorganizmy mogą wiązać od 34 do 60 kg azotu na 1 ha⁴¹. W glebie pod trawami zbożowymi wydajność wiązania azotu w okresie wegetacyjnym sięgała 40 kg azotu na 1 ha¹⁸, a w ciągu 150 dni wegetacji – od 16 do 22 kg azotu na 1 ha⁴². Należy zauważyć, że intensywność wiązania azotu zależy nie tylko od cech gatunkowych roślin, ale także od różnic między odmianami. Znaczną rolę w dostarczaniu azotu do biosfery odgrywa symbiotyczne wiązanie azotu. Czynniki wywołujące ten proces są bakterie tworzące brodawki na korzeniach lub łodygach roślin. Wymienione mikroorganizmy należą do rodzajów *Rhizobium* (6 gatunków), *Bradyrhizobium* (3 gatunki), *Sinorhizobium* (5 gatunków), *Mesorhizobium* (5 gatunków), *Azorhizobium* (1 gatunek)⁴³. Dla tych gatunków bakterii charakterystyczna jest pewna specyficzność względem gatunków, a nawet określonych odmian roślin^{44,45,46} z którymi są one w stanie tworzyć efektywne relacje symbiotyczne.

W optymalnych warunkach funkcjonowania symbiozy strączkowo-ryzobowej potencjalna wielkość symbiotycznego wiązania azotu może sięgać 130–390 kg/ha. Oprócz mikroorganizmów wiążących azot, w skład mikroflory glebowej zawsze wchodzi różne

³⁵ Winogradski S.N. Mikrobiologia gleby. – Moskwa: Wyd-wo Akademii Nauk ZSRR, 1952. – 792 s.

³⁶ Krasilnikow N.A. Mikroorganizmy glebowe i rośliny wyższe. – Moskwa: Wydawnictwo Akademii Nauk ZSRR, 1958. – 462 s. 25

³⁷ Wolkogon W.W., Nadkernichna O.W., Kowalewska T.M. i in. //Preparaty mikrobiologiczne w rolnictwie. Teoria i praktyka. – K.: Nauka Rolnicza, 2006. – 311s.

³⁸ Rubenczyk L.I. Azotobakteria i jej zastosowanie w rolnictwie. – K.: Wydawnictwo Akademii Nauk ZSR, 1960. – 328 s.

³⁹ Sztina E.A. Glony glebowe jako składnik biogeocenozy. - Organizmy glebowe jako składniki biogeocenozy. – Moskwa: Nauka, 1984. – s. 66–81

⁴⁰ Dobereiner J. Associative symbiosis in tropical grasses: characterization of microorganisms and dinitrogen-fixing sites /Dobereiner J., Day J.M. //1-st Int. Symp. of Nitrogen fixation. – Washington: Univ. Press, 1976. – P. 518-537

⁴¹ Jenkinson D.S. Organic matter and nitrogen in soils of the Rothemsted classical experiments /Jenkinson D.S. //J. Sc. Food Agr. – 1973. – № 24. – P. 1149-1150

⁴² Wolkogon W.W. Aktywność wiązania azotu w strefie korzeniowej traw z rodziny zbożowych. - Współczesne problemy ochrony gruntów. Materiały międzynarodowej konferencji naukowej (Kijów, 1997): streszczenia referatów. – Kijów: SOPC Ukrainy, NASU, 1997. – Część 3. – S. 159–160

⁴³ Klucz do identyfikacji bakterii Bergey’a / Pod red. J. Houlta, N. Criga, P. Snita. – Moskwa: Mir, 1997. – T. 1. – S. 1–436; T. 2. – S. 437–799.

⁴⁴ . Didowicz S.V. Tworzenie i funkcjonowanie symbiozy *Mesorhizobium ciceri* – *Cicer arietinum* w agrocenozach południowego stepu Ukrainy: autoref. rozp. kand. nauk rolniczych /S.V. Didowicz; ISGM UAAN.– Czernihów, 2006. – 20

⁴⁵ Syczkar W.I. Selekcja soi pod kątem zwiększenia symbiotycznej fiksacji azotu / Syczkar W.I., Kniazew A.W., Patyka W.F. // Biuletyn naukowo-techniczny WNIIS soi. – Nowosybirsk, 1987. – Wyd. 33. – S. 32–37

⁴⁶ Tolkaczew N.Z. Skoordynowana selekcja soi i *Bradyrhizobium japonicum* pod kątem wysoce efektywnej symbiozy / Tolkaczew N.Z., Syczkar W.I. // Zbiór prac naukowych Państwowego Uniwersytetu Rolniczego w Umaniu. „Nauki biologiczne i problemy uprawy roślin”. – Uman, 2003. – S. 270–276

gatunki bakterii zdolnych do rozkładu substancji organicznych zawierających azot. Proces rozkładu tych substancji przebiega z wydzielaniem amonu i nazywany jest amonifikacją.

Ważnym procesem, który wynika z działania mikroflory glebowej, jest denitryfikacja. Proces ten wiąże się ze spadkiem zawartości azotu mineralnego w glebie i może przebiegać pod wpływem zarówno mikroorganizmów beztlenowych, jak i tlenowych. W procesie denitryfikacji następuje redukcja azotanów poprzez NO_2 -do N_2 . Denitryfikacja, jako proces beztlenowy, znacznie nasila się przy nadmiernym nawodnieniu gleby, a także wtedy, gdy wraz z nawozami organicznymi (obornikiem) stosuje się nawozy mineralne zawierające azotany. Proces denitryfikacji zachodzi również w glebach niezalanych, co wiąże się z tworzeniem w nich mikrozon beztlenowych. Spulchnianie gleby i zwiększenie w niej zawartości tlenu hamuje denitryfikację⁴⁷. Jednak naruszenie struktury gleby, jej rozdrobnienie sprzyja wzrostowi zawartości podtlenu azotu w atmosferze glebowej³⁴.

Mikrobiologiczna mobilizacja fosforu w glebie

Fosfor, pod względem wpływu na rozwój roślin zajmuje drugie miejsce po azocie. Zawartość fosforu w glebach Europy sięga 0,05–0,15 %, a w warstwie gleby o grubości jednego metra, w zależności od jej rodzaju, wynosi od 1,8 do 22,9 t/ha⁴⁸.

W glebie fosfor występuje w postaci związków organicznych (fitina, glicerofosforan, resztki kwasów nukleinowych i innych związków), a także w postaci trudno rozpuszczalnych związków nieorganicznych. Główna część fosforu organicznego w glebie skupiona jest w fitynie⁴⁹. Zawartość fosforu w związkach organicznych gleby sięga 25–85% jego całkowitej ilości, a w stosunku do materii organicznej gleby wynosi od 0,5 do 2,0%. Od 15 do 75% fosforu w glebie występuje w postaci trudno rozpuszczalnych związków nieorganicznych: fosforanu wapnia, żelaza, glinu, wchodzących w skład szeregu minerałów (apatytu, fluoroapatytu, fosforytu, wiwianitu itp.)⁵⁰. W związku z tym, że fosfor w glebie występuje w postaciach trudno dostępnych dla roślin, przy jego ogólnej zawartości w warstwie ornej wynoszącej 1000 kg/ha, jego zawartość w roztworze glebowym nie przekracza 1 kg⁵¹. Pomimo wysokiej całkowitej zawartości

⁴⁷ Schlegel G. Mikrobiologia ogólna. – Moskwa: Mir, 1987. – 567 s

⁴⁸ Nosko B.S. Regulacja reżimu fosforowego głównych typów gleb URR. – Agrochemia. – 1983. – Nr 10. – S. 32–40.

⁴⁹ Richardson A.E. Extracellular secretion of Aspergillus phytase 31 from Arabidopsis roots enables plants to obtain phosphorus from phytate /Richardson A.E., Hadobas P.A., Hayes J.E. //Plant J. – 2001. – Vol. 25, № 6. – P. 641–649

⁵⁰ Mishustin E.N. Mikrobiologia / E.N. Mishustin, V.T. Emtsev. – Moskwa: Vysshaja szkoła, 1978. – 350 s

⁵¹ Szewczuk M.J. Efektywność wykorzystania lokalnych fosforytów /Szewczuk M.J., Gawryliuk W.A., Szewczuk A.M. //Materiały międzynarodowej konferencji naukowo-praktycznej „Fos-

fosforu w glebach występuje on głównie w formach mało mobilnych. Stopień jego wykorzystania przez rośliny z gleby wynosi zaledwie 3–5 %⁵². Nawet fosforany wprowadzane do gleby w postaci nawozów są przyswajane przez rośliny z niską wydajnością. Dostępność fosforu dla roślin w roku wprowadzenia nawozów do gleby wynosi od 10 do 30 %⁵³. Wynika to ze zdolności tlenków wapnia, żelaza, glinu i innych pierwiastków, a także minerałów ilastych, nie tylko do wiązania jonów fosforu, ale także do ich zatrzymywania⁴⁶. Wiele gatunków mikroorganizmów jest w stanie mobilizować fosfor z trudno rozpuszczalnych związków żelaza, glinu i wapnia⁵⁴. Są one szeroko rozpowszechnione w ekosystemach rolniczych. Na przykład ich udział w ryzosferze kukurydzy sięga 45%, a w przypadku bawełny i mandarynki – 60% całkowitej liczebności mikroflory⁵⁵.

Według innych danych⁵⁶ zawartość mikroorganizmów mobilizujących fosforany w ryzosferze roślin uprawnych sięga 15–30%. Największą ich liczbę obserwuje się w ryzosferze buraków cukrowych, podczas gdy w ryzosferze pszenicy ozimej, jęczmienia i grochu jest ich znacznie mniej. Aktywnością mobilizacji fosforanu z trudno rozpuszczalnych związków charakteryzują się mikroorganizmy z rodzajów *Pseudomonas*^{20,42}, *Azotobacter*^{57,58,59}, *Enterobacter*⁶⁰, *Pseudomonas*^{61,62}, *Bacillus*^{50,56,61,62,63,64},

for i potas w rolnictwie. Problemy mobilizacji mikrobiologicznej”. – Czernihów-Charków, 2004. – S. 175–182

⁵² Tarasyuk E.G. Niektóre pożyteczne właściwości bakterii ryzosferycznych.- Współczesny stan i perspektywy rozwoju mikrobiologii i biotechnologii. Materiały VI Międzynarodowej konferencji naukowej (Mińsk, 2–6 czerwca 2008 r.). – Mińsk, 2008. – T. 2. – S. 123–125

⁵³ McLaughlin M.H. Phosphorus cycling in wheat-pasture rotation. 1. The source of phosphorus taken up by wheat /McLaughlin M.H., Alston A.M., Martin J.K. //Aust. J. Soil Res. – 1988. – № 26. – P. 323–331.

⁵⁴ Muromtsev G.S. Rola mikroorganizmów glebowych w odżywianiu fosforowym roślin / Muromtsev G.S., Marshunova G.N., Pavlova V.F., 26 Zolnikova N.V. // Postępy mikrobiologii. – 1985. – T. 20. – S. 174–198

⁵⁵ Pavlova V.F. Rozpowszechnienie mikroorganizmów mobilizujących fosforany żelaza i glinu w glebach czerwonoziemnych Gruzji / Pavlova V.F. //Biuletyn VNIISHM. – 1976. nr 18. s. 3–7.

⁵⁶ Tokmakowa L.N. Szczepy *Bacillus polymyxa* i *Achromobacter album* – podstawa do tworzenia preparatów bakteryjnych. - Mikrobiol. czasopismo. – 1997. – T. 59, nr 4. – S. 131–138

⁵⁷ Buławenko L.W. Mobilizacja fosforu przez niektóre mikroorganizmy z trudno rozpuszczalnych fosforanów nieorganicznych / L.W. Buławenko, Z.T. Bega, I.K. Kurdysz // Biuletyn Instytutu Mikrobiologii Rolniczej. – 2000. – nr 6. – S. 55–56.

⁵⁸ Kumar V. Performance and persistence of phosphate solubilizing *Azotobacter chroococcum* in wheat rhizosphere /Kumar V., Aggarwal N.K., Singh B.P. //Folia Microbiol. – 2000. – Vol. 45, № 4. – P. 343–347

⁵⁹ Kumar V. Establishment of phosphate-solubilizing strains of *Azotobacter chroococcum* in the rhizosphere and their effect on wheat cultivars under greenhouse conditions /Kumar V., Behl R.V., Narula N. //Microbiol. Res. – 2001. – Vol. 156, N 1. – P. 87–93.

⁶⁰ Cajkowska L.A. Biofosfor i jego znaczenie w aktywizacji biologicznej fiksacji azotu. - Mikrobiol. żurn. – 1997. 28 – T. 59, nr 4. – S. 95–100

Agrobacterium^{63,65}, *Aspergillus*⁶⁶, *Penicillium*^{62,67}, *Rhodotorula*, bakterie redukujące siarczany z rodzaju *Desulfobacterium*⁶⁸, grzyby mikoryzowe typu pęcherzykowo-drzewiastego⁴¹, *Trichoderma*⁶⁹ i inne. Wykazano⁵⁷, że przy neutralnych wartościach pH trudno rozpuszczalny fosforan wapnia praktycznie nie ulega rozpuszczeniu. Uzyskane wyniki pozwalają przypuszczać, że mobilizacja fosforu z trudno dostępnego fosforanu wapnia zachodzi na powierzchni komórek tych mikroorganizmów i wynika z bezpośredniego oddziaływania tego minerału z kwaśnymi obszarami glikokaliksu. Sprzyja to rozpuszczaniu fosforanu wapnia i zaspokojeniu zapotrzebowania bakterii na fosfor³⁰. Zdolność bakterii *Azotobacter chroococcum* do mobilizacji fosforu z trudno dostępnych związków nieorganicznych została opisana również przez innych autorów⁶⁵. Mikrogrzyby z rodzaju *Trichoderma* są zdolne do mobilizacji fosforu z trudno rozpuszczalnego fosforanu wapnia. Ich aktywność w zakresie mobilizacji fosforu wynosiła około 70% wskaźników *Bacillus megaterium* subsp. *phosphaticum*. Zaszczepianie nasion ciecierzycy tymi grzybami poprawiało ich wzrost i zwiększało plon uprawy⁶⁹.

W glebie powszechnie występują mikroorganizmy, które są w stanie mobilizować fosfor ze związków organicznych. Znaczną rolę w tym procesie odgrywają bakterie przetrwalnikowe z rodzaju *Bacillus*^{62,67,70,71,72}. Związki organiczne fosforu są w stanie

⁶¹ Illialetdinov A.N. Biologiczna mobilizacja związków mineralnych / A.N. Illialetdinov. – Ałma-Ata, 1966. – S. 63–73

⁶² Roy A.A. Nowe szczepy bakterii glebowych mineralizujących organiczne związki fosforu / Roy A.A., Bulavenko L.A., Kurdish I.K. // Czasopismo Mikrobiologiczne. – 2001. – T. 63, nr 4. – S. 9–14.

⁶³ Suchowicka L.A. Przeżywalność i aktywność stymulująca wzrost szczepów *Bacillus megaterium* i *Agrobacterium radiobacter* wprowadzonych do gleby. - *Biochemia i mikrobiologia stosowana*. – 1998. – T.34, nr 1. – S. 87–90

⁶⁴ Tokmakowa L.M. Opracowanie metod i tworzenie preparatów mikrobiologicznych w celu poprawy odżywiania fosforowego i zwiększenia wydajności buraków cukrowych: autoref. rozprawy. kand. nauk rolniczych. – K., 1997. – 20 s

⁶⁵ Suchowicka L.A. Mikroorganizmy mobilizujące fosforany i biofosfor w praktyce rolniczej Białorusi. - *Fosfor i potas w rolnictwie. Problemy mobilizacji mikrobiologicznej*. – Czernihów-Charków, 2004. – S. 135–140

⁶⁶ Kenji T. A novel acid phosphatase from *Aspergillus niger* KV-8 that specifically hydrolyzed C-G phosphate group of phosphoryl oligosaccharides /Kenji T., Hiroshi K., Kaname K. // *Biosci. Biotechnol. and Biochem.* – 1997. – Vol. 61, № 9. – P. 1512-1517.

⁶⁷ Wakelin S.A. Phosphate solubilization by *Penicillium* spp. closely associated with wheat roots /S.A. Wakelin, R.A. Warren, P.R. Harvey, M.H. Ryder // *Biol. Fertil. Soils*. – 2004. – № 40. – P. 36-43

⁶⁸ Karnaczuk O.W. Mobilizacja fosforanu z związków nierozpuszczalnych pod wpływem bakterii redukujących siarczany. - *Mikrobiol.* – 1995. – T. 64, nr 4. – S. 559–563

⁶⁹ Rudresh D.L. Tricalcium phosphate solubilising abilities of *Trichoderma* ssp. in relation to P uptake and growth and yield parameters of chickpea (*Cicer arietinum* L.) /Rudresh D.L., Shivaprakash M.K. and Prasad R.D. // *Can. J. Microbiol.* – 2005. – № 51. – P. 217-222

⁷⁰ Muromtsev G.S. Mikoryza pęcherzykowo-korzeniowa roślin uprawnych na glebach darno-podzolowych ZSRR / Muromtsev G.S., Zolnikova N.V. // *Izvestiya Akademii Nauk ZSRR. Seria biologiczna*. – 1986. – nr 5. – S. 655–667.

rozkładać bakterie z rodzajów *Pseudomonas*, grzyby z rodzajów *Aspergillus*, *Rhizopus*, *Trichotecium*, *Alternaria*, drożdże *Rhodotorula*, *Candida*^{70,71}. Osiąga się to dzięki zdolności mikroorganizmów do syntezy fosfataz.

Potas w glebie i rola mikroorganizmów w zwiększaniu jego dostępności dla roślin

Ważną rolę w odżywianiu roślin odgrywa potas. Jest on dla nich niezbędnym i niezastąpionym pierwiastkiem, który wpływa na stan fizyczny koloidów komórkowych, zwiększa hydrofilowość protoplazmy i przewodność ścian komórkowych, określa ich turgor oraz odporność na niektóre niekorzystne czynniki środowiskowe. Bez wystarczającego zaopatrzenia w potas zmniejsza się mrozoodporność roślin, odporność na suszę, nadmierne nawodnienie, szkodniki i choroby^{73,74}. W trakcie wzrostu roślin potas występuje głównie w postaci jonowej, a tylko około 1% potasu występuje w składzie związków białkowych komórek⁷³. Potencjalne zasoby K_2O w warstwie gleby o grubości jednego metra wynoszą od 180 do 350 t/ha⁷⁵.

Zawartość tego pierwiastka w warstwie ornej sięga 24–51 ton na hektar i waha się od 0,1% w glebach torfowych do 2,3–2,4% w czarnoziemach zwyczajnych⁷³. Intensyfikacja wzrostu roślin i zwiększenie ich plonów dzięki stosowaniu nawozów azotowych i fosforowych powoduje wzrost poboru potasu przez rośliny uprawne o 44–46% w porównaniu z warunkami bez nawożenia⁷⁶. W glebach większości krajów świata występuje ujemny bilans potasu, czemu towarzyszy spadek efektywności stosowania nawozów azotowych i fosforowych⁷⁵. Dostępność potasu dla roślin jest w pewnym stopniu zapewniana przez działanie mikroorganizmów i czynników chemicznych⁷⁶. Znane są prace dotyczące mikrobiologicznej mobilizacji potasu z glinokrzemianów^{61, 76}. Wykazano możliwość mobilizacji potasu przez bakterie glebowe z muskowitu, hydromuskowitu i biotyty⁷⁷.

⁷¹ Muromtsev G.S. O rozpuszczaniu soli kwasu fitynowego przez mikroorganizmy glebowe /Muromtsev G.S., Samoilova T.S. //Dokl. VASKhNIL. – 1975. – Nr 3. – S. 18–19

⁷² Yamane K. Purification and characterization of extracellular soluble and membrane-bound alkaline phosphatases possessing phosphodiesterase activities in *Bacillus subtilis* /Yamane K., Maruo B.J. - *Bacteriol.* – 1978. – Vol. 134, № 1. – P. 100–107.

⁷³ Żarikowa E.A. Potas w glebach brunatnych regionu Primorye. - *Biuletyn Naukowy Uniwersytetu Czerniowieckiego.* – 2005. – Tom 252. *Biologia.* – S. 78–83.

⁷⁴ Polowy W.M. Bilans i dynamika wymiany potasu w glebach obwodu rówieńskiego w zależności od intensyfikacji uprawy roli /Polowy W.M., Dolzhenchuk W.I. //Biuletyn naukowy Uniwersytetu Czerniowieckiego. – 2005. – Wyd. 252. *Biologia.* – S. 207–213

⁷⁵ Nosko B.S. Poziom potasu w glebach i bioprodukcyjność roślin /Nosko B.S., Christenko A.O., Shapovalova V.S. //Materiały międzynarodowej konferencji naukowo-praktycznej „Fosfor i potas w rolnictwie. Problemy mobilizacji mikrobiologicznej”. – Czernihów-Charków, 2004. – S. 233–240.

⁷⁶ Aristovskaya T.V. Mikrobiologia procesów glebotwórczych. – L.: Nauka, 1980. – 186 s

⁷⁷ Michajłowska N.A. Zdolność bakterii ryzobakteryjnych do mobilizacji potasu glebowego /Michajłowska N.A., Luczenok L.A. //Materiały międzynarodowej konferencji naukowo-praktycznej „Fosfor i potas w rolnictwie. Problemy mobilizacji mikrobiologicznej”. – Czernihów-Charków, 2004. – S. 241–25

Znaczenie cebuli jako uprawy warzywnej

Cebula (*Allium cepa* L.) należy do najczęściej uprawianych i mających największe znaczenie gospodarcze spośród roślin warzywnych na świecie. Odgrywa ona istotną rolę, żywieniu i medycynie ze względu na swój charakterystyczny smak i bogaty skład fitochemiczny. Jednak uprawa cebuli wiąże się z poważnymi wyzwaniami, takimi jak nieoptymalny rozwój korzeni, nierówna jakość cebul oraz nieefektywne pobieranie składników odżywczych w zmiennych warunkach glebowych i klimatycznych. Wyzwania te często prowadzą do zmniejszenia plonów, słabej jednolitości upraw i wzrostu kosztów produkcji, szczególnie w intensywnych i wielkoskalowych systemach rolniczych.

W ostatnich latach zrównoważone praktyki rolnicze cieszą się coraz większym zainteresowaniem, ponieważ rolnicy i naukowcy poszukują alternatyw dla konwencjonalnych, wysokonakładowych systemów, które w dużym stopniu opierają się na nawozach chemicznych i pestycydach. Wśród tych nowych praktyk na znaczeniu zyskało nawożenie mikrobiologiczne ze względu na ich potencjał w zakresie stymulowania wzrostu roślin, poprawy efektywności wykorzystania składników odżywczych oraz wzmacniania odporności upraw na stres abiotyczny.

W przeciwieństwie do tradycyjnych nawozów, które bezpośrednio dostarczają składniki odżywcze, jednak nawozy mikrobiologiczne wpływają na fizjologię roślin, morfologię korzeni oraz aktywność mikroorganizmów glebowych w sposób, który optymalizuje wykorzystanie zasobów i sprzyja lepszemu wzrostowi.

System korzeniowy cebuli i dynamika przyswajania składników odżywczych

Cebula (*Allium cepa* L.) jest rośliną o płytkim systemie korzeniowym, który w porównaniu z wieloma innymi roślinami uprawnymi jest stosunkowo słaby i słabo rozgałęziony. Jej system korzeniowy to korzenie włókniste i przybyszowe, wywodzące się głównie z płytki podstawowej cebuli lub płytki łodygowej. Kluczowe cechy systemu: korzenie są cienkie, nierozgałęzione lub lekko rozgałęzione, skupiają się w górnej warstwie gleby o grubości 15–30 cm, włoski korzeniowe są krótkotrwałe i delikatne, niska gęstość korzeni na jednostkę objętości gleby. Z powodu tej ograniczonej architektury korzeniowej cebula charakteryzuje się niską naturalną zdolnością do pozyskiwania składników odżywczych, zmniejszoną wydajnością pobierania wody, ma wyższą wrażliwość na niedobór składników odżywczych i suszę oraz większą zależność od dostępności składników odżywczych w górnej warstwie gleby.

Cebula wymaga zrównoważonego i ciągłego dostarczania składników odżywczych. Azot (N) jest niezbędny do wzrostu liści i tworzenia chlorofilu, odpowiada za wzrost wegetatywny.

Pobieranie składników odżywczych przez cebulę zależy od powierzchni korzeni, rozwinięcia włosników korzeniowych, wilgotności gleby, pH gleby, aktywności mikroorganizmów oraz mobilności składników odżywczych. Strategia wzmacniania korzeni to przede wszystkim stosowanie nawozów mikrobiologicznych.

Zrozumienie działania nawozów mikrobiologicznych ma szczególne znaczenie w uprawie cebuli, gdzie silny system korzeniowy decyduje o pobieraniu wody i skład-

ników odżywczych, a wielkość cebuli, jednolitość plonu i dobre właściwości przechowalnicze są głównymi czynnikami decydującymi o wartości rynkowej. Wczesne ukształtowanie efektywnego systemu korzeniowego może zwiększyć vitalność roślin i wspomóc kolejne etapy formowania się i dojrzewania cebuli. Podobnie poprawa wydajności pobierania składników odżywczych ma wpływ na zmniejszenie zużycia nawozów, obniżenie kosztów produkcji oraz zminimalizowanie wpływu na środowisko.

Technologia uprawy cebuli czerwonej w doświadczeniu

Przygotowanie do badań polegało na uzasadnieniu kryteriów doboru skutecznych preparatów biologicznych, wśród których priorytetowe znaczenie mają: różnorodność funkcjonalna mikroorganizmów, ich wielofunkcyjność oraz komplementarność w składzie mikrobiologicznym. Forma podania preparatu, ma bezpośredni wpływ na biodostępność i skuteczność działania.

Podczas doboru preparatów biologicznych uwzględniono następujące kryteria:

1. Różnorodność funkcjonalna PGPB – w celu zapewnienia kompleksowego oddziaływania na organizm roślinny poprzez różne mechanizmy fizjologiczno-biochemiczne, w szczególności wiązanie azotu, mobilizację fosforanów, syntezę fitohormonów oraz tworzenie związków symbiotycznych.
2. Wielofunkcyjność działania – zdolność preparatów do jednoczesnego oddziaływania na kilka procesów o kluczowym znaczeniu dla życia: odżywianie, adaptację do stresu oraz odporność na organizmy chorobotwórcze.
3. Komplementarność składu mikrobiologicznego – obecność synergii między przedstawicielami różnych grup mikroorganizmów w składzie preparatów biologicznych, co wzmacnia ich ogólny efekt.
4. Forma podawania preparatów – stosowanie preparatów w różnych postaciach (torfowa, płynna, metaboliczna) w celu zbadania wpływu nośnika na skuteczność PGPB.

W niniejszym badaniu analizowano wpływ wybranych nawozów mikrobiologicznych na rozwój korzeni cebuli, jakość cebuli oraz efektywność pobierania składników odżywczych. Poprzez ocenę zarówno reakcji fizjologicznych, jak i agronomicznych, badanie ma na celu wyjaśnienie, czy stosowanie mikroorganizmów może być skuteczną strategią zwiększania plonów i jakości cebuli, przy jednoczesnym promowaniu zrównoważonego zarządzania uprawami.

Opracowano i określono efektywność nawozowych produktów mikrobiologicznych grupy BACTIV (importer firma P.W. lechpol sp. z o.o.) w technologii uprawy czerwonej cebuli. Badania prowadzono w warunkach płodozmianowego doświadczenia polowego na polach firmy P.W. lechpol sp. z o.o. w województwie Kujawsko-Pomorskim. Nawozowe produkty mikrobiologiczne grupy BACTIV zawierają mikroorganizmy: *Bacillus subtilis*, *Paenibacillus*, *Azotobacter*, *Enterococcus*, *Agrobacterium* i grzyby mikoryzowe oraz z rodzaju *Trichoderma*. Preparaty BACTIV poprawiają żyzność gleby, co przekłada się na wyższe plony i lepszą jakość zbiorów. Dodatkowo pożyteczne mikroorganizmy optymalizują pobieranie składników odżywczych i wzmacniają naturalną odporność roślin, pomagając im radzić sobie ze stresem i chorobami, co pozwala ograniczyć stosowanie chemicznych środków ochrony.

Cebula jara (odmiana Red Matte) była wysiana na areale 8 ha 25 marca w ilości 3 j.s./ha, przedplonem była pszenica ozima oraz międzyplon (gorczyca + jary jęczmień).

Rozdrabnianie resztek przedplonu i międzyplonu wykonano broną talerzową, wiosną wykonano głęboszowanie (uproszczony system uprawy) (tab-1)

Tabela. 1. Zestawienie zabiegów uprawowych na polach kontrolnych i testowych, nawożonych nawozowymi produktami mikrobiologicznymi

Uprawa cebuli czerwonej – zabiegi uprawowe	Doświadczenie	
	kontrolne	testowe
Areał, ha	1,0	7,0
Przedplon	Ozima pszenica	
Międzyplon	Gorczyca + jęczmień jary	
Oprysk po ściernisku Bactiv Tynan, l/ha	-	1,5
Uprawa: po resztkach roślinnych	Talerzowanie	
Wiosną uproszczony system uprawa	Głęboszowanie	
Zaprawa nasion Bactiv Myco, kg/ha	-	0,05
Siew, j.s/ha	3,0	
Nawozy mineralne, kg/ha: 10:26:26	300	200
saletra amonowa	300	200
mocznik	100	70
Nawozy dolistne, kg, l/ha: saletra wapniowa	12	8
Siarczan magnezu siedmiowodny	7,5	5
Perfektmakro 20:20:20+ME	10	
Bactiv Nitro	-	0,6
Bactiv Optima	-	0,5
Bactiv Aqua	-	0,2
Bactiv Help	-	0,8
Ilość zabiegów nawozami dolistnymi	7	4

Źródło: opracowanie własne

Ocena wpływu nawozowych produktów mikrobiologicznych na plon cebuli czerwonej

Na podstawie badań polowych ustalono, że wstępna obróbka materiału siewnego cebuli czerwonej produktem BACTIV-MYCO istotnie wpływa na rozwój systemu korzeniowego cebuli (rys. 1a i 1b). Efekty widoczne wizualnie: zwiększona długość korzeni, lepsze tworzenie korzeni bocznych, zwiększona gęstość włóśników oraz większa powierzchnię korzeni. Dzieje to przez obecność substancji podobnych do hormonów (które aktywują komórki merystemu korzeniowego, polepszają wydłużanie komórek i zwiększają transport węglowodanów do korzeni. Aktywne mikroorganizmy nawozowego produktu mikrobiologicznego Bactiv (rys. 2) pomagają cebuli tolerować stresy

abiotyczne, takie jak: susza, upały, zasolenie i niedobór składników odżywczych. To odbywa się dzięki zwiększonej aktywności enzymów antyoksydacyjnych, nagromadzeniu osmolitów, lepsze zatrzymywanie wody i jak rezultat zmniejszone uszkodzenia oksydacyjne. Ochrona przed stresem pozwala utrzymać aktywność korzeni i wchłanianie składników odżywczych w niekorzystnych warunkach. W warunkach suszy, upałów lub niedoboru składników odżywczych cebule często stają się mniejsze, zniekształcone, pęknięte i często bardzo niskiej jakości



Rysunek 1a. System korzeniowy cebuli z pól nawożonych nawozowymi produktami mikrobiologicznymi doświadczalnych



Rysunek 1b. System korzeniowy cebuli - doświadczenie kontrolne

Nawozowe produkty mikrobiologiczne łagodzą te skutki poprzez utrzymanie fotosyntezy, ochronę enzymów metabolicznych, wspomaganie pobierania składników odżywczych w warunkach stresu a stabilizację gospodarki wodnej roślin. Prowadzi to do lepszej jakości cebul nawet w niekorzystnych warunkach uprawy.



Rysunek 2. Jednolite pod względem kształtu i wymiarów cebule na poletkach nawożonych BACTIV-MYCO pomimo niekorzystnych warunków upraw

Bakterie zwiększają mineralizację składników odżywczych, rozpuszczają fosforany uwalniając związany fosfor, także bakterie wiążące azot zwiększają dostępność azotu. Przez obecność w nawozach mikrobiologicznych grzybów rodzaju *Trichoderma* uzyskuje się efekt chelatowania (wiązania) składników mineralnych. Dzięki produkcji specyficznych metabolitów, grzyby te przekształcają nierozpuszczalne formy minerałów w formy łatwo przyswajalne przez rośliny.

Nawozowe produkty mikrobiologiczne poprawiają zdrowie korzeni poprzez wypieranie patogenów w wyniku konkurencji, wytwarzanie związków przeciugrzybiczych, indukują odporność ogólnoustrojową i tworzą biofilmu wokół korzeni (*Trichoderma spp*, *Bacillus spp*, *Pseudomonas spp*). Zdrowsze korzenie charakteryzują się wyższym wskaźnikiem wchłaniania składników odżywczych i dłuższą żywotnością funkcjonalną.

Udowodniono, że nawozy mikrobiologiczne Bactiv mają pozytywny wpływ na inicjację tworzenia cebulek i tempo ich rozwoju, a także na wielkość i masę cebuli (tab.2), zwiększenie zawartości suchej masy, wzmocnienie tkanki cebuli. Wzrost i jakość cebuli są głównymi czynnikami ekonomicznymi w uprawie cebuli. Wartość rynkowa zależy nie tylko od wielkości cebuli i plonu, ale także od parametrów jakościowych, takich jak jędrność, jednolitość, zawartość suchej masy, ostrość, kolor skórki, trwałość podczas przechowywania oraz odporność na straty po zbiorach. Ponieważ rozwój cebuli zależy w dużym stopniu od wydajności korzeni, pobierania składników odżywczych i równowagi metabolicznej rośliny, biostymulatory pośrednio i bezpośrednio wpływają na wydajność cebuli. Cechy skórki cebuli wpływają na atrakcyjność rynkową na przechowywanie i okres przydatności do spożycia.

Bakterie nawozów Bactiv przyczyniają się do lepszej grubości skórki, lepszej przyczepności skórki, lepszej intensyfikacji koloru oraz zmniejszenia pęknięcia skórki.

Dzieje się to dzięki lepszemu odżywianiu wapniem i potasem oraz zwiększonej stabilności metabolicznej.

Tabela 2. Plonowanie cebuli w warunkach stresu abiotycznego bez i z wykorzystaniem nawozów mikrobiologicznych

Wariant	Dawka, (kg/ha)			Liczba zabiegów		Data	Plon
	azotu	fosforu	potasu	fungicydowych	insektycydowych	zbioru	(t/ha)
Kontrola	180	80	80	7	5	28.08	24,6
Test	120	52	52	3	3	16.09	28,7

**Efektywność technologii oceniano po zbiorze przy standardowych zabiegach agrotechnicznych*

Podsumowanie

Uzyskane wyniki potwierdzają, że zastosowanie nawozowych produktów mikrobiologicznych BACTIV-OPTIMA, BACTIV-HELP oraz BACTIV-MYCO w nawożeniu cebuli sprzyjało przedłużeniu wegetacji i zwiększeniu plonów o 16,5%, co świadczy o ich bezwarunkowej skuteczności. Zastosowanie nawozów mikrobiologicznych pozwoliło zmniejszyć liczbę oprysków w porównaniu z kontrolą, co znacznie zwiększyło rentowność plonów z jednego hektara. Badania udowodniły, że wykorzystanie mikroorganizmów w uprawie cebuli:

- istotnie wpływa na rozwój systemu korzeniowego cebuli,
- zwiększa powierzchnię korzeni,
- optymalizuje pobieranie składników odżywczych,
- wzmacnia naturalną odporność roślin,
- pozwala ograniczyć stosowanie chemicznych środków ochrony,
- zwiększa mineralizację składników odżywczych,
- pomaga cebuli tolerować stresy abiotyczne,
- ma pozytywny wpływ na inicjację tworzenia cebulek i tempo ich rozwoju, a także na wielkość i masę cebuli,
- ma pozytywny wpływ na zwiększenie zawartości suchej masy oraz jakości cebuli.

Stosowanie nawozów mikrobiologicznych wiąże się z wieloma korzyściami agromonicznymi w przypadku różnych upraw, w tym ze wzrostem plonów, poprawą cech jakościowych (np. wielkości, koloru, okresu przydatności do spożycia) oraz zwiększoną odpornością w warunkach stresowych. W przypadku uprawy cebuli, gdzie wczesny rozwój korzeni i efektywne wykorzystanie składników odżywczych mają znaczący wpływ na tworzenie się cebulek i ich jakość, nawozy mikrobiologiczne stanowią obiecujące narzędzie do optymalizacji wydajności roślin. Jednak trzeba pamiętać, że na reakcję na stosowanie biostymulatorów może wpływać rodzaj biostymulatora, genotyp uprawy, właściwości gleby, klimat oraz metoda i termin stosowania.

Bibliografia

- Aristovskaya T.V. Mikrobiologia procesów glebotwórczych. – L.: Nauka, 186, 1980.
- Azot biologiczny / [Patyka V.P., Kots S.Ya., Volkogon V.V. i in.]. – Kijów: Svit, 2003. – 422 s.
- Babiewa I.P. Biologia gleb / I.P. Babiewa, G.M. Zenowa. – Moskwa: Wydawnictwo Uniwersytetu Moskiewskiego, 335 s. 1989.
- Buławenko L.W. Mobilizacja fosforu przez niektóre mikroorganizmy z trudno rozpuszczalnych fosforanów nieorganicznych / L.W. Buławenko, Z.T. Bega, I.K. Kurdysz // Biuletyn Instytutu Mikrobiologii Rolniczej. Nr 6. s. 55–56, 2000.
- Cajkowska L.A. Biofosfor i jego znaczenie w aktywizacji biologicznej fiksacji azotu // Mikrobiol. żurnal. 28 – T. 59, nr 4. s. 95–100, 1997.
- Czajka T. O. Mikoryza – skuteczne biotechnologie w uprawie roślin. Problemy i osiągnięcia współczesnej biotechnologii: V Międzynarodowa konferencja naukowo-praktyczna (Charków, 28 marca 2025 r.). Charków: Narodowy Uniwersytet Farmaceutyczny, 2025.
- Czajka T. O., Liaszenko V. V., Chomenko B. S. Wpływ inokulacji nasion na plon soi w uprawie ekologicznej. Tawrijski Biuletyn Naukowy. Seria Nauki Rolnicze. 2023. Nr 133. S. 180–187.
- Czernowa L.S. Azotobacter vinelandii IMV B-7076 – perspektywny producent substancji biologicznie czynnych dla uprawy roślin / Czernowa L.S., Kurdysz I.K. // Materiały IV Międzynarodowej konferencji naukowej „Regulacja wzrostu, rozwoju i wydajności roślin” (Mińsk, 26–28.10.2005). – Mińsk, s. 243. 2005.
- Davey M.E. Microbial biofilms: from ecology to molecular genetics / Davey M.E., O’Toole G.A. // Microbiol. and Molecular Biol. Reviews. Vol. 64, № 4. – pp. 847–867, 2000.
- Didowicz S.V. Tworzenie i funkcjonowanie symbiozy Mesorhizobium ciceri – Cicer arietinum w agrocenozach południowego stepu Ukrainy: autoref. rozp. kand. nauk rolniczych / S.V. Didowicz; ISGM UAAN. – Czernihów, 20 s. 2006.
- Dobereiner J. Associative symbiosis in tropical grasses: characterization of microorganisms and dinitrogen-fixing sites / Dobereiner J., Day J.M. // 1-st Int. Symp. of Nitrogen fixation. – Washington: Univ. Press, pp. 518–537, 1976.
- Dobrowolska T.G. Różnorodność bakteryjna gleb: ocena method, możliwości, perspektyw / T.G. Dobrowolska, L.V. Lysak, G.M. Zenova, D.G. Zvyagintsev // Mikrobiol. T. 70, nr 2. s. 149–167. 2001.
- Etesami H., Maheshwari D. K. Use of plant growth promoting rhizobacteria (PGPRs) with multiple plant growth promoting traits in stress agriculture: Action mechanisms and future prospects. Ecotoxicology and Environmental Safety. Vol. 156. pp. 225–246. 2018.
- Garland J.L. Culturability as an indicator of succession in microbial communities / Garland J.L., Cook K.L., Adams J.L., Kerkhof L. // Microbiol. Ecol. – 2001. – Vol. 42, № 2. – P. 150–158.
- Genetyczne podstawy selekcji bakterii brodawkowych / Pod red. B.W. Simarowa – L.: Leningradskie VO Agropromizdat, – pp. 192. 1990.
- Gill S. S., Tuteja N. Reactive oxygen species and antioxidant machinery in abiotic stress tolerance in crop plants. Plant Physiol. Biochem. Vol. 48. pp. 909–930. 2010.
- Golovko E.A. Mikroorganizmy w allelopatii roślin wyższych / E.A. Golovko. – K.: Naukova Dumka, s. 197, 1984.
- Igiehon N. O., Babalola O. O., Cheseto X., Torto B. Effects of rhizobia and arbuscular mycorrhizal fungi on yield, size distribution and fatty acid of soybean seeds grown under drought stress. Microbiol Res. Vol. 242, e126640, 2021.
- Illialetdinov A.N. Biologiczna mobilizacja związków mineralnych. Alma-Ata, pp. 63–73, 1966.
- Jenkinson D.S. Organic matter and nitrogen in soils of the Rothemsted classical experiments / Jenkinson D.S. // J. Sc. Food Agr. № 24. – P. 1149–1150. 1973.
- Karnaczuk O.W. Mobilizacja fosforanu z związków nierozpuszczalnych pod wpływem bakterii redukujących siarczany. - Mikrobiol. T. 64, nr 4. pp. 559–563. 1995.

- Kaushal M. Microbes in cahoots with plants: MIST to hit the jackpot of agricultural productivity during drought. *Int J Mol Sci.* Vol. 20 (7), e1769. 2019.
- Kenji T. A novel acid phosphatase from *Aspergillus niger* KV-8 that specifically hydrolyzed C-G phosphate group of phosphoryl oligosaccharides /Kenji T., Hiroshi K., Kaname K. // *Biosci. Biotechnol. and Biochem.* Vol. 61, № 9. – P. 1512-1517. 1997.
- Klucz do identyfikacji bakterii Bergey'a / Pod red. J. Hoult, N. Criga, P. Snita. – Moskwa: Mir, – T. 1. pp. 1–436; T. 2. pp. 437–799, 1997.
- Krasilnikow N.A. Mikroorganizmy glebowe i rośliny wyższe. – Moskwa: Wydawnictwo Akademii Nauk ZSRR, 462 s. 25, 1958.
- Kravchenko L.V. Wydzieliny korzeniowe pomidorów i ich wpływ na wzrost oraz aktywność przeciwrzybiczą szczepów *Pseudomonas* /Kravchenko L.V., Azarova T.S., Leonova-Erko E.I. i in. // *Mikrobiol. T.* 72, nr 1. pp. 48–53. 2003.
- Kudzin J.K. Nawozy bakteryjne. – Kijów: Derzhsilgospvydav URSR, pp.108, 1962.
- Kumar V. Establishment of phosphate-solubilizing strains of *Azotobacter chroococcum* in the rhizosphere and their effect on wheat cultivars under greenhouse conditions /Kumar V., Behl R.V., Narula N. // *Microbiol. Res.* Vol. 156, Nr 1. pp. 87-93. 2001.
- Kumar V. Performance and persistence of phosphate solubilizing *Azotobacter chroococcum* in wheat rhizosphere /Kumar V., Aggarwal N.K., Singh B.P. // *Folia Microbiol.* Vol. 45, № 4. pp. 343-347. 2000.
- Kuske C.R. Diverse uncultivated bacterial groups from soils of the arid southwestern United States that are present in many geographic regions /Kuske C.R., Barus S.M. and Buchs J.D. // *Appl. Environ. Microbiol.* Nr 63. pp. 3614-3621. 1997.
- Liao Z., Chen B., Boubakri H. et al. The regulatory role of phytohormones in plant drought tolerance. *Planta.* Vol. 261, e98, 2025.
- Lynch J.M. Promotion and inhibition of soils aggregate stabilization by microorganisms /Lynch J.M., *J. Gen. Microbiol.* Nr 126. pp. 371- 373, 1981.
- Malceva N.N. Aktywność wiązania azotu i mikroorganizmy wiążące azot w ryzoserferze żyta ozimego / Malceva N.N., Nadkernichnaja E.V., Volkogon V.V., Ushakova M.A. // *Mikrobiol. Żurnal*, T. 54, nr 6. pp. 10–15. 1992.
- McLaughlin M.H. Phosphorus cycling in wheat-pasture rotation. 1. The source of phosphorus taken up by wheat /McLaughlin M.H., Alston A.M., Martin J.K. // *Aust. J. Soil Res.* Nr 26. pp. 323-331, 1988.
- Meena K. K., Sorty A. M., Bitla U. M. et al. Abiotic stress responses and microbe-mediated mitigation in plants: The omics strategies. *Frontiers in Plant Science.* Vol. 8, 2017.
- Michajłowska N.A. Zdolność bakterii ryzobakteryjnych do mobilizacji potasu glebowego /Michajłowska N.A., Luczenok L.A. // *Materiały międzynarodowej konferencji naukowo-praktycznej „Fosfor i potas w rolnictwie. Problemy mobilizacji mikrobiologicznej”*. Czerniów-Charków, – pp. 241–250. 2004.
- Patika V.P., Tichonowicz I.A., Filipiew I.D. i in *Mikroorganizmy i rolnictwo alternatywne.* – K.: Urozhaj, pp. 173, 1993.
- Mishustin E.N. *Mikrobiologia* / E.N. Mishustin, V.T. Emtsev. – Moskwa: Vysshaja szkola, pp. 350, 1978.
- Mishustin E.N. *Mikroorganizmy a wydajność rolnictwa.* – Moskwa: Nauka, pp. 342, 1972.
- Muromtsev G.S. Mikoryza pęcherzykowo-korzeniowa roślin uprawnych na glebach darno-podzolowych ZSRR / Muromtsev G.S., Zolnikova N.V. // *Izvestiya Akademii Nauk ZSRR. Seria biologiczna.* Nr 5, pp. 655–667, 1986.
- Muromtsev G.S. O rozpuszczaniu soli kwasu fitynowego przez mikroorganizmy glebowe /Muromtsev G.S., Samoilova T.S. // *Dokl. VASKhNIL.* Nr 3. pp. 18–19, 1975.
- Muromtsev G.S. Rola mikroorganizmów glebowych w odżywianiu fosforowym roślin / Muromtsev G.S., Marshunova G.N., Pavlova V.F., 26 Zolnikova N.V. // *Postępy mikrobiologii.* T. 20. pp. 174–198, 1985.

- Nosko B.S. Poziom potasu w glebach i bioprodukcyjność roślin /Nosko B.S., Christenko A.O., Shapovalova V.S. //Materiały międzynarodowej konferencji naukowo-praktycznej „Fosfor i potas w rolnictwie. Problemy mobilizacji mikrobiologicznej”. Czernihów-Charków, pp. 233–240, 2004.
- Nosko B.S. Regulacja reżimu fosforowego głównych typów gleb URR. *Agrochemia*. Nr 10. pp. 32–40. 1983.
- Oades J.M. The role of biology in the formation, stabilization and degradation of soil structure /Oades J.M. //Geoderma. Nr 56. pp. 377–400. 1993.
- Pavlova V.F. Rozpowszechnienie mikroorganizmów mobilizujących fosforany żelaza i glinu w glebach czerwonoziemnych Gruzji. - *Biuletyn VNIISHM*. Nr 18. pp. 3–7. 1976.
- Polowy W.M. Bilans i dynamika wymiany potasu w glebach obwodu rówieńskiego w zależności od intensyfikacji uprawy roli /Polowy W.M., Dolzhenchuk W.I. //Biuletyn naukowy Uniwersytetu Czerniowieckiego. Wyd. 252. *Biologia*. pp. 207–213. 2005.
- Preparaty mikrobiologiczne w rolnictwie. Teoria i praktyka /Wolkogon W.W., Nadkernichna O.W., Kowalewska T.M. i in.] *Nauka Rolnicza*, pp. 311, 2006.
- Richarson A.E. Extracellular secretion of *Aspergillus* phytase 31 from *Arabidopsis* roots enables plants to obtain phosphorus from phytate /Richarson A.E., Hadobas P.A., Hayes J.E. //Plant J. Vol. 25, Nr 6. pp. 641–649. 2001.
- Rosario de Filipe Anton Ma. Interacciones microorganismo suelo-planta en la preservación del Medio Ambiente y la Salud /Rosario de Filipe Anton Ma //An. Real acad.nac.farm. Vol. 70, Nr 3. pp. 743–776. 2004.
- Roy A.A. Nowe szczepy bakterii glebowych mineralizujących organiczne związki fosforu / Roy A.A., Bulavenko L.A., Kurdish I.K. *Czasopismo Mikrobiologiczne*. T. 63, Nr 4. pp. 9–14. 2001.
- Rubenczyk L.I. Azotobakteria i jej zastosowanie w rolnictwie. Wydawnictwo Akademii Nauk ZSRR, pp. 328, 1960.
- Rudresh D.L. Tricalcium phosphate solubilising abilities of *Trichoderma* ssp. in relation to P uptake and growth and yield parameters of chickpea (*Cicer arietinum* L.) /Rudresh D.L., Shivaprakash M.K. and Prasad R.D. //Can. J. Microbiol. 51. pp. 217–222. 2005.
- Schlegel G. Mikrobiologia ogólna. Moskwa: pp. 567, 1987.
- Shaukat S., Mustafa G., Cheng K. Phytohormones for combating global challenges: an ecofriendly approach. In M. Faizan, S. Hayat (Eds), *Plant growth regulators: resilience for sustainable agriculture*. Springer Singapore, 2024.
- Suchowicka L.A. Mikroorganizmy mobilizujące fosforany i biofosfor w praktyce rolniczej Białorusi. - Fosfor i potas w rolnictwie. Problemy mobilizacji mikrobiologicznej. Czernihów-Charków, pp. 135–140. 2004.
- Suchowicka L.A. Przeżywalność i aktywność stymulująca wzrost szczepów *Bacillus megaterium* i *Agrobacterium radiobacter* wprowadzonych do gleby. *Biochemia i mikrobiologia stosowana*. T.34, nr 1. pp. 87–90, 1998.
- Syczkar W.I. Selekcja soi pod kątem zwiększenia symbiotycznej fiksacji azotu / Syczkar W.I., Kniazew A.W., Patyka W.F. *Biuletyn naukowo-techniczny WNIIS soi*. Nowosybirsk, Wyd. 33. pp. 32–37, 1987.
- Szewczenko I.P. Wpływ metod uprawy i nawożenia na stan cenozy mikrobiologicznej oraz właściwości fitotoksyczne typowej gleby czarnoziemowej erodowanej / Szewczenko I.P., Drach J.O., Jatsenko S.V. *Biuletyn Nauk Rolniczych*. Nr 10. pp. 12–15. 2006.
- Szewczuk M.J. Efektywność wykorzystania lokalnych fosforytów /Szewczuk M.J., Gawryliuk W.A., Szewczuk A.M. //Materiały międzynarodowej konferencji naukowo-praktycznej „Fosfor i potas w rolnictwie. Problemy mobilizacji mikrobiologicznej”. Czernihów-Charków, pp. 175–182. 2004.
- Sztina E.A. Glony glebowe jako składnik biogeocenozy. Organizmy glebowe jako składniki biogeocenozy. Moskwa: Nauka, pp. 66–81. 1984.

- Tarasjuk E.G. Niektóre pożyteczne właściwości bakterii ryzosferycznych. Współczesny stan i perspektywy rozwoju mikrobiologii i biotechnologii. Materiały VI Międzynarodowej konferencji naukowej (Mińsk, 2–6 czerwca 2008 r.). Mińsk, T. 2. pp. 123–125. 2008.
- Tate R.L. Soil microbial diversity research whither to now. *Soil Sci.* Vol. 162, № 9. pp. 605–606. 1997.
- Titowa L.V. Wpływ materiałów o wysokiej dyspersji na aktywność fizjologiczną bakterii z rodzaju *Azotobacter* / Titowa L.V., Antypczuk A.F., Kurdysz I.K. i in. *Mikrobiol. czasopismo.* T. 56, nr 3. pp. 60–65. 1994.
- Tokmakowa L.M. Opracowanie metod i tworzenie preparatów mikrobiologicznych w celu poprawy odżywiania fosforowego i zwiększenia wydajności buraków cukrowych: autoref. rozprawy... kand. nauk rolniczych . pp. 20, 1997.
- Tokmakowa L.N. Szczepy *Bacillus polymyxa* i *Achromobacter album* – podstawa do tworzenia preparatów bakteryjnych. - *Mikrobiol. czasopismo.* T. 59, Nr 4. pp. 131–13, 1997.
- Tolkaczew N.Z. Skoordynowana selekcja soi i *Bradyrhizobium japonicum* pod kątem wysoce efektywnej symbiozy / Tolkaczew N.Z., Syczkar W.I. // Zbiór prac naukowych Państwowego Uniwersytetu Rolniczego w Umaniu. „Nauki biologiczne i problemy uprawy roślin”. Uman, pp. 270–276, 2003.
- Trivedi P., Leach J. E., Tringe S.G. et al. Plant-microbiome interactions: from community assembly to plant health. *Nat Rev Microbiol.* Vol. 18. pp. 607–21, 2020.
- Umarow M.M. Asocjacyjna fiksacja azotu. Moskwa, MSU, pp. 136, 1986.
- Umarow M.M. Mikrobiologiczna transformacja azotu w glebie /M.M. Umarow, A.W. Kurakow, A.L. Stepanow. – Moskwa: GEOS, pp. 137, 2007.
- Wakelin S.A. Phosphate solubilization by *Penicillium* spp. closely associated with wheat roots /S.A. Wakelin, R.A. Warren, P.R. Harvey, M.H. Ryder // *Biol. Fertil. Soils.* nr 40. pp. 36–43, 2004.
- Winogradski S.N. Mikrobiologia gleby. Moskwa: W-wo Akademii Nauk ZSRR, pp. 79, 1952.
- Wolkogon W.W. Aktywność wiązania azotu w strefie korzeniowej traw z rodziny zbożowych. - Współczesne problemy ochrony gruntów. Materiały międzynarodowej konferencji naukowej (Kijów, 1997): streszczenia referatów. – Kijów: SOPC Ukrainy, NASU, – Część 3. pp. 159–160, 1997.
- Xie X. G., Zhang F. M., Yang T. et al. Endophytic fungus drives nodulation and N₂ fixation attributable to specific root exudates. *mBio.* Vol. 10 (4), e00728–19, 2019.
- Yamane K. Purification and characterization of extracellular soluble and membrane-bound alkaline phosphatases possessing phosphodiesterase activities in *Bacillus subtilis* /Yamane K., Maruo B. // *J. Bacteriol.* Vol. 134, nr 1. pp. 100–107, 1978.
- Zhang C., van der Heijden M. G. A., Dodds B. K. et al. A tripartite bacterial-fungal-plant symbiosis in the mycorrhiza-shaped microbiome drives plant growth and mycorrhization. *Microbiome.* Vol. 12(1), 2024.
- Zhang J. E., Feng L. F., Ouyang Y. et al.. Phosphate-solubilizing bacteria and fungi in relation to phosphorus availability under different land uses for some latosols from Guangdong, China. *CATENA.* Vol. 195, e104686, 2020.
- Żarikowa E.A. Potas w glebach brunatnych regionu Primorye /E.A. Żarikowa // *Biuletyn Naukowy Uniwersytetu Czerniowieckiego.* Tom 252. *Biologia.* pp. 78–83, 2005.

Adres do korespondencji: maryna@lechpol-szubin.pl

STRUKTURA KOSZTÓW A EFEKTYWNOŚĆ FUNKCJONOWANIA PRZEDSIĘBIORSTW MŚP W POLSCE

Rafał Kornas^{1,2}, Elżbieta Olech¹

¹ Katedra Inżynierii Produkcji Logistyki i Informatyki Stosowanej, Uniwersytet Rolniczy w Krakowie

² Państwowa Akademia Nauk Stosowanych w Chełmie

Wprowadzenie

Sektor małych i średnich przedsiębiorstw (MŚP) stanowi fundamentalny element współczesnych gospodarek - zarówno w ujęciu krajowym, jak i międzynarodowym. W Polsce jego znaczenie jest szczególnie widoczne, gdyż przedsiębiorstwa tego sektora odpowiadają za znaczącą część tworzonego PKB, generują istotny poziom zatrudnienia oraz skupiają zdecydowaną większość aktywnych przedsiębiorstw.

W warunkach rosnącej zmienności otoczenia gospodarczego, w tym presji wzrostu kosztów energii oraz pracy, szczególnego znaczenia nabiera problem efektywnego zarządzania kosztami działalności. Struktura kosztów przedsiębiorstwa, rozumiana jako proporcjonalny udział poszczególnych kategorii kosztów w kosztach ogółem, stanowi jeden z zasadniczych czynników determinujących jego konkurencyjność oraz zdolność do generowania zysku^{1,2}.

W literaturze przedmiotu podkreśla się, że przedsiębiorstwa MŚP charakteryzują się większą wrażliwością na zmiany kosztów w porównaniu do dużych podmiotów gospodarczych. Wynika to m.in. z ograniczonych zasobów finansowych, mniejszej skali działalności oraz niższego poziomu dywersyfikacji ryzyka³. Jednocześnie rosnące koszty operacyjne, głównie w obszarze energii i wynagrodzeń, stanowią jedno z najważniejszych wyzwań dla tego sektora.

Pomimo licznych opracowań dotyczących funkcjonowania MŚP, nadal obserwuje się niedostateczne powiązanie analizy struktury kosztów z oceną efektywności funkcjonowania przedsiębiorstw. Brakuje badań uwzględniających dynamiczne zmiany kosztów w ostatnich latach oraz ich wpływ na wyniki ekonomiczne przedsiębiorstw.

W związku z powyższym zasadne jest podjęcie analizy zależności pomiędzy strukturą kosztów a efektywnością funkcjonowania przedsiębiorstw sektora MŚP w Polsce, ze szczególnym uwzględnieniem aktualnych uwarunkowań gospodarczych.

¹ Nowak E., Rachunkowość zarządcza. Polskie Wydawnictwo Ekonomiczne, 2019.

² Drury C., Management and cost accounting (10th ed.). Cengage Learning, 2018.

³ OECD, SME and entrepreneurship outlook 2021. OECD Publishing, 2021.

Istota i klasyfikacja kosztów w przedsiębiorstwie

Koszty działalności przedsiębiorstwa stanowią jedną z podstawowych kategorii ekonomicznych, jak również kluczowy element systemu rachunkowości zarządczej. W ujęciu klasycznym definiowane są jako wyrażone w jednostkach pieniężnych zużycie zasobów niezbędnych do prowadzenia działalności gospodarczej⁴. Ich znaczenie wykracza jednak poza samą ewidencję zdarzeń gospodarczych, gdyż koszty stanowią jednocześnie narzędzie oceny sprawności funkcjonowania przedsiębiorstwa, a także jego konkurencyjności oraz zdolności do osiągnięcia nadwyżki ekonomicznej. W praktyce właściwa identyfikacja, klasyfikacja i analiza kosztów tworzą podstawę racjonalnych decyzji dotyczących produkcji, sprzedaży, inwestycji, polityki cenowej oraz organizacji procesów wewnętrznych^{5,6}.

W literaturze przedmiotu wyróżnia się liczne klasyfikacje kosztów. Różnią się w zależności od przyjętego kryterium podziału. Do najczęściej stosowanych należą: podział na koszty stałe i zmienne, bezpośrednie i pośrednie, a także koszty według miejsc powstawania oraz nośników kosztów^{7,8}. Każdy z tych podziałów pełni odmienną funkcję poznawczą i decyzyjną. Podział na koszty stałe i zmienne ma szczególne znaczenie w analizie progu rentowności oraz identyfikacji ryzyka operacyjnego przedsiębiorstwa. Rozróżnienie kosztów bezpośrednich i pośrednich pozwala na dokładniejsze przypisanie nakładów do konkretnych produktów, usług lub zleceń, co ma zasadnicze znaczenie dla kalkulacji cen, oceny opłacalności oraz kontroli rentowności poszczególnych segmentów działalności.

W literaturze polskiej podkreśla się, że rachunek kosztów pełni nie tylko funkcję ewidencyjną, ale przede wszystkim informacyjną i decyzyjną⁹. Oznacza to, że jego zadaniem nie jest jedynie odzwierciedlenie poniesionych nakładów, ale także dostarczanie informacji użytecznych z punktu widzenia zarządzania bieżącego i strategicznego. Współczesne podejścia do zarządzania kosztami wskazują na konieczność ich ścisłego powiązania z procesami zarządzania strategicznego oraz operacyjnego¹⁰. Z tej perspektywy koszty stają się nie tylko kategorią rozliczeniową, ale również miernikiem efektywności wykorzystania zasobów, jakości procesów oraz stopnia dopasowania struktury organizacyjnej do warunków otoczenia rynkowego.

Z perspektywy efektywności funkcjonowania przedsiębiorstwa szczególne znaczenie ma nie tyle sam poziom kosztów, ile ich struktura oraz dynamika zmian w czasie. Przedsiębiorstwo może osiągać relatywnie wysokie przychody, a mimo to pozostawać mało efektywne, jeśli poziom kosztów (zwłaszcza kosztów stałych, kosztów pośrednich

⁴ Nowak E., 2018, *ibidem*.

⁵ Szychta A., Definicja rachunkowości zarządczej w ujęciu ewolucyjnym, *Prace Naukowe Uniwersytetu Ekonomicznego we Wrocławiu*, 513, 2018.

⁶ Czapla T., Walińska E., *Rachunkowość z perspektywy nauk o zarządzaniu i jakości – głos w dyskusji*, Zeszyty Teoretyczne Rachunkowości, 113, 2021.

⁷ Drury C., 2018, *ibidem*.

⁸ Horngren C. T., Datar S. M., Rajan M., *Cost accounting*. Pearson, 2018.

⁹ Sobańska I., *Rachunkowość zarządcza*. C.H. Beck, 2018.

¹⁰ Karmańska, A. (red.). *Rachunkowość zarządcza i rachunek kosztów w systemie informacyjnym przedsiębiorstwa*, Difin, Warszawa 2009.

lub kosztów niewytwarzających wartości dodanej) jest zbyt wysoki. Przez co analiza kosztów powinna obejmować nie tylko ich globalną wartość, ale również relację do przychodów, wyników finansowych, produktywności zasobów oraz rentowności kapitału. W warunkach gospodarki rynkowej, charakteryzującej się presją konkurencyjną, inflacją kosztową i rosnącą zmiennością otoczenia, umiejętność kontroli oraz optymalizacji kosztów staje się jednym z czynników przewagi konkurencyjnej przedsiębiorstw w Polsce.

Znaczącym kierunkiem rozwoju rachunkowości zarządczej jest wdrażanie nowoczesnych metod kalkulacji kosztów, takich jak rachunek kosztów działań (ABC) oraz rachunek kosztów oparty na czasie (TDABC), które umożliwiają bardziej precyzyjne przypisanie kosztów do działań i procesów¹¹. Metody te odpowiadają na ograniczenia tradycyjnych systemów rozliczania kosztów, zwłaszcza w warunkach rosnącej złożoności procesów, dywersyfikacji produktów i usług oraz zwiększonego znaczenia kosztów pośrednich¹². Zastosowanie ABC i TDABC pozwala lepiej identyfikować źródła kosztów, ujawniać obszary marnotrawstwa oraz wspierać decyzje ukierunkowane na poprawę efektywności procesowej. W konsekwencji rachunek kosztów staje się nie tylko narzędziem pomiaru, ale również instrumentem aktywnego kształtowania sprawności funkcjonowania przedsiębiorstwa¹³.

Struktura kosztów w przedsiębiorstwach sektora MŚP

Struktura kosztów przedsiębiorstw sektora MŚP stanowi istotny obszar badawczy. Przedsiębiorstwa te charakteryzują się odmienną strukturą kosztów niż duże podmioty gospodarcze. Wynika to przede wszystkim z ograniczonej skali działalności, niższego poziomu automatyzacji oraz większego udziału pracy ludzkiej¹⁴. W efekcie koszty pracy oraz koszty usług zewnętrznych często dominują w strukturze kosztów MŚP, podczas gdy w dużych przedsiębiorstwach wyższy udział mają koszty amortyzacji i koszty pośrednie związane z utrzymaniem infrastruktury produkcyjnej. Ta specyfika struktury kosztów determinuje zarówno poziom rentowności, jak i elastyczność reakcji na zmiany otoczenia gospodarczego.

Z danych publikowanych przez PARP wynika, że w strukturze kosztów MŚP dominują koszty pracy, koszty materiałów i surowców oraz koszty usług obcych¹⁵. Według „Raportu o stanie sektora małych i średnich przedsiębiorstw w Polsce 2025” mikroprzedsiębiorstwa, które generują blisko 28% PKB, charakteryzują się wysokim udziałem kosztów pracy (do 40% struktury kosztów), podczas gdy średnie przedsiębiorstwa wykazują większy udział kosztów materiałowych (ok. 25-30%). Wysoki udział tych

¹¹ Kaplan R.S., Anderson S. R., *Time-Driven Activity-Based Costing: A Simpler and More Powerful Path to Higher Profits*, Harvard Business Press, Boston 2007.

¹² Biadacz, R., *Rachunek kosztów działań - badanie rozwoju publikacji w polskich czasopiśmiech*, Prace Naukowe Uniwersytetu Ekonomicznego we Wrocławiu, 514, 2018.

¹³ Wnuk-Pel T., *Management accounting systems in SMEs. Zeszyty Teoretyczne Rachunkowości*, 2019.

¹⁴ OECD, 2021, *ibidem*.

¹⁵ PARP, *Raport o stanie sektora małych i średnich przedsiębiorstw w Polsce 2026*. Polska Agencja Rozwoju Przedsiębiorczości, 2026.

kosztów wynika z relatywnie niskiego poziomu kapitałochłonności oraz ograniczonej automatyzacji procesów produkcyjnych i usługowych.

W literaturze podkreśla się, że struktura kosztów przedsiębiorstw MŚP jest silnie uzależniona od branży oraz poziomu zaawansowania technologicznego¹⁶. Przedsiębiorstwa produkcyjne charakteryzują się wyższym udziałem kosztów materiałowych i energetycznych, natomiast w sektorze usług dominują koszty pracy oraz usług obcych. Dane GUS¹⁷ z 2024 r. potwierdzają, że w przetwórstwie przemysłowym koszty energii i paliw stanowiły średnio 12-15% kosztów operacyjnych, podczas gdy w handlu detalicznym udział ten nie przekraczał 8%.

Istotnym zjawiskiem obserwowanym w ostatnich latach jest wzrost kosztów energii oraz ich wpływ na funkcjonowanie przedsiębiorstw. W kontekście transformacji energetycznej oraz niestabilności rynków surowców energetycznych koszty te stanowią coraz większe obciążenie dla przedsiębiorstw, szczególnie w sektorze MŚP¹⁸. W 2023 r. średnioroczny wskaźnik cen konsumpcyjnych nośników energii wzrósł o 17,5%, co znacząco wpłynęło na koszty operacyjne polskich MŚP. Stabilizacja cen prądu do końca 2024 r. była istotnym wsparciem dla sektora.

Badania empiryczne wskazują na ograniczony poziom wykorzystania zaawansowanych narzędzi rachunkowości zarządczej w przedsiębiorstwach MŚP. Jak zauważa Wnuk-Pel¹⁹, przedsiębiorstwa rzadziej wdrażają systemy rachunku kosztów działań czy controllingu – może to ograniczać ich zdolność do efektywnego zarządzania kosztami. W konsekwencji wiele MŚP opiera się na uproszczonych metodach kalkulacji kosztów, co utrudnia identyfikację obszarów nieefektywności oraz podejmowanie decyzji optymalizujących strukturę kosztów. Brak zaawansowanych narzędzi rachunkowych znacząco wpływa na zdolność do kontroli kosztów pośrednich i kosztów administracyjnych, które w sektorze MŚP często pozostają niedoszacowane.

W ujęciu międzynarodowym podkreśla się, że efektywne zarządzanie strukturą kosztów stanowi jeden z kluczowych czynników determinujących odporność przedsiębiorstw na zmiany otoczenia gospodarczego²⁰. W warunkach rosnącej presji kosztowej, inflacji oraz niepewności geopolitycznej umiejętność elastycznego reagowania na zmiany struktury kosztów staje się warunkiem przetrwania, a zwłaszcza rozwoju, przedsiębiorstw MŚP.

Pojęcie i miary efektywności przedsiębiorstwa

Efektywność przedsiębiorstwa jest kategorią wielowymiarową. Może być analizowana w różnych ujęciach teoretycznych i praktycznych. W ujęciu ekonomicznym ozna-

¹⁶ GUS, Komunikat o średniorocznym wskaźniku cen nośników energii, Główny Urząd Statystyczny, 2023.

¹⁷ GUS, Działalność przedsiębiorstw niefinansowych 2024. Główny Urząd Statystyczny, 2024.

¹⁸ European Commission, Energy prices and costs in Europe, 2022.

¹⁹ Wnuk-Pel T., Zastosowanie rachunku kosztów działań w przedsiębiorstwach w Polsce, Wydawnictwo Uniwersytetu Łódzkiego, 2012.

²⁰ Nielsen L. B., Mitchell F., Nørreklit, H., Management accounting and control systems. Palgrave Macmillan, 2019.

cza relację pomiędzy osiąganymi efektami a ponoszonymi nakładami, co pozwala ocenić stopień wykorzystania zasobów w procesie tworzenia wartości gospodarczej²¹. W literaturze podkreśla się, że efektywność przedsiębiorstwa powinna być rozumiana jako zdolność do maksymalizacji efektów przy minimalizacji nakładów – z uwzględnieniem zarówno aspektów ilościowych, jak i jakościowych działalności gospodarczej²².

W praktyce gospodarczej efektywność przedsiębiorstwa oceniana jest przede wszystkim przy wykorzystaniu wskaźników finansowych, takich jak rentowność sprzedaży (ROS), rentowność aktywów (ROA) oraz rentowność kapitału własnego (ROE)²³. Wskaźniki te tworzą podstawowy zestaw mierników oceny zdolności przedsiębiorstwa do generowania zysku z różnych perspektyw: sprzedaży, aktywów i kapitału własnego. Na poziomie operacyjnym stosuje się dodatkowo wskaźniki takie jak wskaźnik obrotu aktywami, wskaźnik rotacji zapasów oraz wskaźnik cyklu gotówkowego, które pozwalają ocenić efektywność zarządzania kapitałem obrotowym i procesami operacyjnymi.

Literatura podkreśla jednak, że ocena efektywności powinna mieć charakter kompleksowy i uwzględniać aspekty operacyjne oraz długookresowe²⁴. W tym kontekście istotne znaczenie mają miary efektywności kosztowej, takie jak: wskaźnik kosztów do przychodów, wskaźnik marży brutto oraz wskaźnik efektywności kosztowej definiowany jako stosunek przychodów do kosztów operacyjnych. Literatura polska szczególnie podkreśla znaczenie analizy parametrów technicznych: współczynnik wykorzystania zdolności produkcyjnych, produktywność pracy czy produktywność środków trwałych²⁵. Pozwalają one ocenić efektywność na poziomie procesów technologicznych i organizacyjnych.

W kontekście przedsiębiorstw polskich istotne jest również zastosowanie metod porównawczych, takich jak analiza wskaźnikowa oraz analiza benchmarkingowa (porównanie z najlepszymi praktykami w branży). Badania empiryczne wskazują, że kompleksowa ocena efektywności wymaga jednoczesnego wykorzystania wskaźników finansowych, operacyjnych oraz jakościowych, takich jak poziom satysfakcji klientów, wskaźnik retencji klientów czy stopa innowacyjności.

W ujęciu strategicznym efektywność przedsiębiorstwa powinna być rozpatrywana w perspektywie balansowanej karty wyników (BSC), która integruje cztery główne obszary: finanse, klient, procesy wewnętrzne oraz rozwój i uczenie się²⁶. Taki podejście pozwala nie tylko zmierzyć bieżącą efektywność, ale również monitorować realizację strategii długookresowej oraz zdolność przedsiębiorstwa do adaptacji do zmieniających się warunków rynkowych.

²¹ Samuelson P. A., Nordhaus W. D., *Economics* (20th ed.). McGraw-Hill Education, 2019.

²² Sierpińska M., Jachna T., *Ocena przedsiębiorstwa według standardów światowych* (4th ed.). Polskie Wydawnictwo Ekonomiczne, 2018.

²³ Brigham E. F., Ehrhardt M. C., *Financial management: Theory & practice* (16th ed.). Cengage Learning, 2020.

²⁴ Badertscher B., Shroff R., White H. D., *External oversight and financial reporting quality*. *Contemporary Accounting Research*, 36(4), 2019.

²⁵ Sierpińska M., Jachna T., 2018, *ibidem*.

²⁶ Kaplan R. S., Norton D. P., *The balanced scorecard: Translating strategy into action*. Harvard Business Press, 1996.

W kontekście analizy struktury kosztów i efektywności funkcjonowania przedsiębiorstw w Polsce szczególnie istotne są miary łączące efekty finansowe z kosztami. Można tu zaliczyć: wskaźnik kosztów zmiennych do przychodów, wskaźnik kosztów stałych do aktywów oraz wskaźnik dźwigni operacyjnej. Te miary pozwalają ocenić, w jakim stopniu struktura kosztów wpływa na rentowność przedsiębiorstwa oraz jego odporność na wahania popytu i cen.

Zależność struktury kosztów i efektywności funkcjonowania przedsiębiorstw

Zależność pomiędzy strukturą kosztów a efektywnością przedsiębiorstwa stanowi istotny obszar badań empirycznych i teoretycznych. W literaturze wskazuje się, że struktura kosztów wpływa bezpośrednio na poziom ryzyka operacyjnego oraz zdolność adaptacyjną przedsiębiorstwa do zmian koniunkturalnych²⁷.

W odniesieniu do przedsiębiorstw sektora MŚP zależność ta ma szczególne znaczenie, ponieważ podmioty te dysponują ograniczonymi zasobami i są bardziej narażone na zmiany otoczenia²⁸. Badania empiryczne pokazują, że MŚP o dominującym udziale kosztów zmiennych (powyżej 60%) wykazują wyższą elastyczność kosztową i lepszą odporność na spadki popytu, podczas gdy firmy z wysokim udziałem kosztów stałych (powyżej 50%) są bardziej wrażliwe na wahania koniunktury gospodarczej.

Badania wskazują, że przedsiębiorstwa aktywnie zarządzające kosztami osiągają lepsze wyniki finansowe oraz większą odporność na zmiany koniunktury²⁹. W polskim kontekście potwierdzają to analizy empiryczne, które wykazały dodatnią korelację między racjonalizacją struktury kosztów a wskaźnikami rentowności w okresie 2015-2020.

Zarządzanie strukturą kosztów jako narzędzie budowania odporności na kryzysy gospodarcze zyskuje na znaczeniu w dobie niepewności geopolitycznej i inflacji kosztowej. Badania wskazują, że przedsiębiorstwa stosujące aktywne strategie kosztowe (redukcja kosztów stałych, outsourcing, renegocjacja kontraktów) wykazują istotnie wyższą odporność na szoki przychodowe w porównaniu z firmami pasywnie zarządzającymi kosztami³⁰.

Metodyka badawcza

Badanie ma charakter teoretyczno-analityczny i opiera się na analizie literatury przedmiotu oraz danych wtórnych. Przyjęte podejście umożliwia ocenę zależności pomiędzy strukturą kosztów a efektywnością funkcjonowania przedsiębiorstw sektora MŚP w Polsce, z uwzględnieniem aktualnych uwarunkowań gospodarczych.

²⁷ Drury C., 2018, *ibidem*.

²⁸ OECD, 2021, *ibidem*.

²⁹ Nielsen L.B. et al. 2019, *ibidem*.

³⁰ Cao V., Gu A., Wang K., Yang J., Survive the economic downturn: Operating flexibility, productivity, and stock crash risk, SSRN Working Paper, 2024; Mysore M. i in., Bubbles pop, downturns stop, McKinsey & Company 2019.

Podstawę teoretyczną opracowania stanowią trzy uzupełniające się podejścia³¹. Pierwsze nawiązuje do koncepcji zarządzania kosztami, która wskazuje na znaczenie struktury kosztów jako jednego z kluczowych czynników wpływających na wyniki finansowe przedsiębiorstwa oraz jego elastyczność operacyjną^{32,33}. Drugie podejście bazuje na teorii efektywności ekonomicznej; analizie poddaje się relację pomiędzy ponoszonymi nakładami a uzyskiwanymi efektami, wykorzystując mierniki takie jak rentowność czy produktywność^{34,35}. Trzecie podejście odwołuje się do koncepcji konkurencyjności przedsiębiorstw, podkreślając rolę przewagi kosztowej jako istotnego źródła pozycji rynkowej, zwłaszcza w sektorze MŚP³⁶.

W części empirycznej zastosowano analizę treści dokumentów oraz danych statystycznych, obejmujących raporty i opracowania publikowane m.in. przez Polską Agencję Rozwoju Przedsiębiorczości (PARP), Główny Urząd Statystyczny (GUS), Polski Instytut Ekonomiczny (PIE) oraz PKO Bank Polski (PKO BP). Wykorzystane dane wtórne pozwoliły na identyfikację struktury kosztów przedsiębiorstw oraz ocenę ich wyników ekonomicznych w ujęciu dynamicznym (2014-2024) i przekrojowym (klasy wielkości firm).

Analizę przeprowadzono z wykorzystaniem metod porównawczych. Uwzględniono w szczególności udział poszczególnych kategorii kosztów w kosztach całkowitych wskaźnik poziomu kosztów (relacja kosztów ogółem do przychodów) oraz wybrane mierniki rentowności, co umożliwiło uchwycenie zależności pomiędzy badanymi zmiennymi. Dobór materiału badawczego oparto na kryteriach aktualności i wiarygodności źródeł, ze szczególnym uwzględnieniem danych obejmujących okres po 2020 r.

Analiza porównawcza

Sektor mikro, małych i średnich przedsiębiorstw (MŚP) pozostaje fundamentem polskiej gospodarki (Raport PARP edycja 2026). Według najnowszych danych Polskiej Agencji Rozwoju Przedsiębiorczości w Polsce w 2024 r. działało 2,37 mln aktywnych przedsiębiorstw niefinansowych, o 2,9% więcej niż rok wcześniej, a w dekadzie 2014-2024 populacja firm zwiększyła się o 28,9%. Sektor MŚP stanowi 99,8% wszystkich aktywnych podmiotów, przy czym dominującą rolę odgrywają mikroprzedsiębiorstwa, ich udział w populacji firm wynosi 97,2%^{37,38}.

³¹ Cohen M., Cui S., Doetsch S., Ernst R., Huchzermeier A., Kouvelis P., Lee H., Matsuo H., Tsay A., Understanding global supply chain and resilience: Theory and practice. In *Creating values with operations and analytics*, Springer, 2022.

³² Drury C., 2018, *ibidem*.

³³ Nowak E., et al., 2019, *ibidem*.

³⁴ Brigham E. F., Ehrhardt M. C., *Financial management: Theory & practice* (16th ed.). Cengage Learning, 2020.

³⁵ Samuelson P. A., Nordhaus W. D., *Economics* (20th ed.). McGraw-Hill Education, 2019.

³⁶ Porter M. E., *Competitive advantage: Creating and sustaining superior performance*. Free Press, 2019.

³⁷ PARP, *Raport o stanie sektora małych i średnich przedsiębiorstw w Polsce 2026*. Polska Agencja Rozwoju Przedsiębiorczości, 2026.

³⁸ GUS, *Działalność przedsiębiorstw niefinansowych 2024*. Główny Urząd Statystyczny, 2024.

Tendencje obserwowane w obrębie poszczególnych klas wielkości są jednak zróżnicowane. Wzrost liczby podmiotów koncentruje się niemal wyłącznie w segmencie mikrofirm (+30,8% w dekadzie), podczas gdy zarówno małe (-18,2%), jak i średnie przedsiębiorstwa (-7,1%) wykazują strukturalne kurczenie populacji. Tak ukształtowana struktura sektora ma istotne konsekwencje dla analizy kosztów: dominacja mikrofirm oznacza odmienny profil kosztowy całego sektora w porównaniu z gospodarkami, w których większy udział mają firmy średnie.

Tabela 1. Liczba aktywnych przedsiębiorstw niefinansowych w Polsce wg klas wielkości (w tys.).

Klasa wielkości	2014	2022	2023	2024	Zmiana (%) 2014-2024
Mikro (0-9)	1 764,6	2 283,4	2 240,1	2 307,8	+30,8%
Małe (10-49)	59,2	48,2	48,7	48,42	-18,2%
Średnie (50-249)	15,5	14,3	14,4	14,4	-7,1%
MŚP łącznie	1 839,3	2 345,9	2 303,2	2 370,6	+28,9%
Duże (≥ 250)	3,4	3,8	3,8	3,9	+14,7%
Ogółem	1 842,7	2 349,7	2 307,1	2 374,5	+28,9%

Źródło: opracowanie własne na podstawie^{39, 40}

Według raportu PARP, w 2023 r. polskie przedsiębiorstwa wytworzyły 74,8% wartości dodanej krajowej (wzrost o 0,7 p.p. r/r), z czego MŚP odpowiadały za 47,2% PKB, wartość ta w porównaniu z 2022 r. wzrosła o 0,6 p.p. odwracając spadkową tendencję obserwowaną w latach 2019-2022⁴¹. Mikroprzedsiębiorstwa pozostają największym kontrybutorom PKB (28,5%), wyprzedzając duże firmy o 0,9 p.p. Ten układ udziałów, w którym najmniejsze podmioty generują największy strumień wartości dodanej czyni efektywność kosztową mikrofirm zagadnieniem kluczowym dla makroekonomicznej kondycji całego sektora.

Wskaźnik poziomu kosztów (WPK), wyrażający relację kosztów ogółem do przychodów ze sprzedaży, jest jednym z najczęściej stosowanych mierników efektywności kosztowej. Im niższa jego wartość, tym wyższa marża operacyjna i większa elastyczność firmy w reagowaniu na wahania popytu lub cen czynników produkcji. Polskie mikroprzedsiębiorstwa wyróżniają się na tym tle pozytywnie, ich struktura kosztów jest o ok. 9-13 p.p. korzystniejsza niż w pozostałych klasach wielkości.

Zwraca uwagę przeciwstawny kierunek zmian w obu krańcach rozkładu wielkości firm. W mikroprzedsiębiorstwach wskaźnik poziomu kosztów obniżył się w latach 2022-2024 o 2,9%, co wskazuje na rosnącą elastyczność kosztową tej grupy, najprawdopodobniej za sprawą szybkiej cyfryzacji procesów oraz ograniczania trwale obciążających kosztów stałych. W przeciwnym kierunku zmierzały duże firmy, ich wskaźnik poziomu kosztów wzrósł o 2,1%, a w skali całego sektora niefinansowego aż o 2,7%, tj.

³⁹ GUS, Wyniki finansowe przedsiębiorstw niefinansowych 2024. Główny Urząd Statystyczny, 2024. https://stat.gov.pl/files/gfx/portalinformacyjny/pl/defaultaktualnosci/5502/12/56/1/wyniki_finansowe_przedsiębiorstw_niefinansowych.pdf

⁴⁰ PARP, Raport o stanie sektora małych i średnich przedsiębiorstw w Polsce 2026. Polska Agencja Rozwoju Przedsiębiorczości, 2026.

⁴¹ PARP, Raport o stanie sektora małych i średnich przedsiębiorstw w Polsce 2026. Polska Agencja Rozwoju Przedsiębiorczości, 2026.

najwyższego poziomu od dekady. Można zatem sformułować tezę, że odporność kosztowa polskiej gospodarki w okresie 2022-2024 utrzymywała się przede wszystkim dzięki segmentowi mikrofirm, podczas gdy duże podmioty wyraźnie traciły bufor marży.

Tabela 2. Wskaźnik poziomu kosztów (relacja kosztów ogółem do przychodów) przedsiębiorstw niefinansowych w Polsce wg klas wielkości

Wielkość przedsiębiorstwa \ Rok	2022	2023	2024	Zmiana (%) 2022-2024
Mikro (do 9 osób)	84,0%	82,0%	81,6%	-2,9%
Małe (10-49)	93,0%	93,3%	93,5%	+0,5%
Średnie (50-249)	94,0%	94,2%	94,5%	+0,5%
Duże (≥250)	94,0%	95,0%	96,0%	+2,1%
Sektor niefinansowy ogółem	93,9%	95,3%	96,4%	+2,7%

Źródło: opracowanie własne na podstawie^{42,43}

Według danych GUS dotyczących przedsiębiorstw niefinansowych po III kwartale 2024 r. strukturę rodzajową kosztów ogółem polskich przedsiębiorstw niefinansowych w 2024 r. zdominowały trzy kategorie: zużycie materiałów (38,4%), usługi obce (23,2%) oraz wynagrodzenia (16,4%)⁴⁴. Pozostałe pozycje to łącznie ok. 22% kosztów, które obejmują obciążenia o charakterze obowiązkowym (ubezpieczenia społeczne, podatki) oraz koszty kapitałowe (amortyzacja).

Tabela 3. Struktura rodzajowa kosztów ogółem przedsiębiorstw niefinansowych (2024)

Kategoria kosztów	Udział 2024 (%)
Zużycie materiałów	38,4
Usługi obce	23,2
Wynagrodzenia	16,4
Ubezpieczenia społeczne i świadczenia	4,5
Amortyzacja	4,1
Pozostałe koszty rodzajowe	4
Zużycie energii	3,3
Podatki i opłaty	2,1
Wartość sprzedanych towarów i materiałów	4

Źródło: opracowanie własne na podstawie⁴⁵

Łączny udział kosztów rzeczowych, obejmujących zużycie materiałów, usługi obce oraz energię wynosi 64,9% kosztów ogółem. W przypadku sektora MŚP udział ten jest jeszcze wyższy ze względu na niższą kapitałochłonność tych podmiotów (mniejsza

⁴² Polski Instytut Ekonomiczny, Rentowność polskich przedsiębiorstw w latach 2020-2024 (X 2025). <https://pie.net.pl/wp-content/uploads/2025/10/Rentownosc-polskich-przedsiębiorstw.pdf>

⁴³ PKO BP, Mikroprzedsiębiorstwa 2025. https://cdn-netpr.pl/file/attachment/2920950/6e/pko_mikroprzedsiębiorstwa_2025.pdf

⁴⁴ GUS, Wyniki finansowe przedsiębiorstw niefinansowych za I–III kwartał 2024 r., Główny Urząd Statystyczny, Warszawa 2024.

⁴⁵ GUS, Wyniki finansowe przedsiębiorstw niefinansowych 2024. Główny Urząd Statystyczny, 2024.

skala amortyzacji) oraz silniejsze uzależnienie od dostawców zewnętrznych. Oznacza to, że MŚP są szczególnie wrażliwe na szoki cenowe surowców i półproduktów, które w latach 2022-2024 wynikały zarówno z zaburzeń łańcuchów dostaw, jak i wzrostu cen energii w Europie.

Postępująca pracochłonność mierzona łącznym udziałem wynagrodzeń i świadczeń (20,9% w 2024 r.) odzwierciedla narastającą presję rynku pracy. Jest ona szczególnie odczuwalna dla mikrofirm i małych przedsiębiorstw o wysokim udziale pracy żywej (m.in. usługi profesjonalne, gastronomia, handel detaliczny), ponieważ w tych podmiotach koszty osobowe stanowią najtrudniej redukowalną pozycję, a ich rachunek zysków i strat reaguje na wzrost płacy minimalnej oraz składek znacznie szybciej niż w firmach o wysokiej kapitałochłonności.

Rok 2024 okazał się najsłabszym pod względem rentowności polskich przedsiębiorstw w ciągu ostatniej dekady. Wskaźnik rentowności obrotu netto spadł do 3,4% (z 5,1% w 2022 i 4,3% w 2023), a udział firm rentownych zmniejszył się do 77,2% - niemal co czwarty podmiot zakończył rok stratą. Pogorszeniu uległy także rentowność sprzedaży brutto (4,8% wobec 6,0% w 2022 r.) oraz rentowność obrotu brutto (4,4% wobec 6,1% w 2022 r.).

Tabela 4. Wybrane wskaźniki efektywności operacyjnej i rentowności przedsiębiorstw niefinansowych w Polsce w latach 2014-2024

Wskaźnik (%)	2014	2019	2022	2023	2024
Wskaźnik poziomu kosztów	95,2	94,8	93,9	95,3	96,4
Rentowność sprzedaży brutto	4,8	5,2	6	5,5	4,8
Rentowność obrotu brutto	4,2	4,8	6,1	4,7	4,4
Rentowność obrotu netto	3,3	4,1	5,1	4,3	3,4
Udział firm rentownych	78,3	79,4	83,1	80,8	77,2

Źródło: opracowanie własne na podstawie⁴⁶

Dynamika wskaźnika poziomu kosztów, rentowności obrotu netto i udziału firm rentownych wykazuje charakterystyczną symetrię: do 2022 r. zauważalny był okres stopniowej poprawy efektywności (wskaźnik poziomu kosztów 93,9%, rentowność netto 5,1%, firmy rentowne 83,1%), po czym kierunek zmian uległ odwróceniu. Lata 2023-2024 to wyraźny regres na wszystkich trzech wymiarach, którego źródeł należy upatrywać przede wszystkim w trzech czynnikach: szoku kosztowym (wzrost cen energii i materiałów), restrykcyjnej polityce monetarnej (wysokie koszty finansowania) oraz presji płacowej wynikającej z wysokiej inflacji. Te zmiany dotknęły w nierównym stopniu firmy zaliczane do poszczególnych klas wielkości - duże firmy odnotowały najsilniejszy wzrost wskaźnika poziomu kosztów, podczas gdy mikroprzedsiębiorstwa, dzięki większej elastyczności operacyjnej, zdołały kontynuować stopniową obniżkę kosztów względem przychodów⁴⁷.

⁴⁶ GUS, Wyniki finansowe przedsiębiorstw niefinansowych 2024. Główny Urząd Statystyczny, 2024.

⁴⁷ GUS, Wyniki finansowe przedsiębiorstw niefinansowych za I–III kwartał 2024 r., Główny Urząd Statystyczny, Warszawa 2024.

Podsumowanie

Polski sektor MŚP cechuje strukturalna dominacja mikrofirm, które w 2024 r. stanowiły 97,2% populacji podmiotów aktywnych i odpowiadały za 28,5% wartości dodanej krajowej, co czyni je najistotniejszym pojedynczym kontrybutorem PKB. W tym samym okresie liczba małych i średnich przedsiębiorstw zmalała odpowiednio o 18,2% i 7,1% w porównaniu z 2014 r., co świadczy o trudnościach w skalowaniu działalności i o barierach przejścia z fazy mikro do segmentu firm dojrzałych.

Jednocześnie to właśnie mikroprzedsiębiorstwa wyróżniają się najkorzystniejszą strukturą kosztów: ich wskaźnik poziomu kosztów w 2024 r. wyniósł 81,6% i był o 9-13 p.p. niższy niż w pozostałych klasach wielkości. W kierunku przeciwnym ewoluował wskaźnik poziomu kosztów firm dużych (wzrost z 94,0% do 96,0% w latach 2022-2024) oraz całego sektora niefinansowego (wzrost o 2,7%, do 96,4%). Oznacza to, że odporność kosztowa polskiej gospodarki w analizowanym okresie utrzymywała się głównie dzięki segmentowi mikrofirm, a nie dzięki przedsiębiorstwom o większej skali. Tłem tego zjawiska pozostaje struktura rodzajowa kosztów polskich przedsiębiorstw, silnie zorientowana na nakłady rzeczowe tj. zużycie materiałów, usługi obce i energia łącznie odpowiadają za 64,9% kosztów ogółem, a w sektorze MŚP udział ten jest jeszcze wyższy ze względu na niższą kapitałochłonność, co czyni te podmioty szczególnie wrażliwymi na szoki cenowe surowców i nośników energii. Dla Polskich firm istotne są też koszty pracy, które wynoszą wraz ze świadczeniami 20,9%. Na przestrzeni lat obserwuje się ich systematyczny wzrost wskutek presji płacowej i podwyżek płacy minimalnej.

Tak ukształtowane uwarunkowania znalazły wyraźne odbicie w wynikach finansowych, rok 2024 zaznaczył się jako najłabszy pod względem rentowności w całej dekadzie 2014-2024. Rentowność obrotu netto spadła do 3,4%, a udział firm rentownych zmniejszył się do 77,2%, co oznacza, że niemal co czwarty podmiot zakończył rok stratą. Pogorszenie wyników finansowych dotknęło wszystkich klas wielkości, jednak jego źródła m.in. szok kosztowy, restrykcyjna polityka monetarna i presja płacowa w odmienny sposób oddziałują na firmy o różnej strukturze kosztów. Mikrofirmy, dzięki niższej kapitałochłonności i większej elastyczności operacyjnej, zdołały częściowo zniwelować te zjawiska, podczas gdy firmy duże okazały się znacznie mniej odporne, co potwierdza rosnący wskaźnik poziomu kosztów w tym segmencie.

Uzyskane wyniki potwierdzają zatem tezę teoretyczną o ścisłym związku struktury kosztów z efektywnością funkcjonowania przedsiębiorstwa. Klasy podmiotów o niższym udziale kosztów stałych (mikrofirmy) oraz mniejszej kapitałochłonności wykazują wyraźnie wyższą elastyczność kosztową w warunkach niestabilności gospodarczej, co przekłada się na korzystniejsze relacje pomiędzy nakładami a efektami. Z perspektywy zarządczej oznacza to, że dla polskich MŚP istotnymi kierunkami dalszego umacniania pozycji konkurencyjnej pozostają optymalizacja kosztów rzeczowych (w szczególności energii i materiałów) inwestycje w cyfryzację procesów obniżającą pracochłonność oraz rozwój kompetencji zarządczych w obszarze rachunku kosztów. W szerszym ujęciu polityki gospodarczej wyniki te wskazują, że stabilność sektora MŚP, a w konsekwencji odporność polskiej gospodarki, wymaga instrumentów wsparcia adresowanych w sposób różnicujący wobec poszczególnych klas wielkości firm.

Bibliografia

- Badertscher B., Shroff R., White H. D., External oversight and financial reporting quality. *Contemporary Accounting Research*, 36(4), 2019.
- Biadacz, R., Rachunek kosztów działań - badanie rozwoju publikacji w polskich czasopismach, *Prace Naukowe Uniwersytetu Ekonomicznego we Wrocławiu*, 514, 2018.
- Brigham E. F., Ehrhardt M. C., *Financial management: Theory & practice* (16th ed.). Cengage Learning, 2020.
- Cao V., Gu A., Wang K., Yang J., Survive the economic downturn: Operating flexibility, productivity, and stock crash risk, SSRN Working Paper, 2024; Mysore M. i in., *Bubbles pop, downturns stop*, McKinsey & Company 2019.
- Cohen M., Cui S., Doetsch S., Ernst R., Huchzermeier A., Kouvelis P., Lee H., Matsuo H., Tsay A., Understanding global supply chain and resilience: Theory and practice. In *Creating values with operations and analytics*, Springer, 2022.
- Czapla T., Walińska E., Rachunkowość z perspektywy nauk o zarządzaniu i jakości – głos w dyskusji, *Zeszyty Teoretyczne Rachunkowości*, 113, 2021.
- Drury C., *Management and cost accounting* (10th ed.). Cengage Learning, 2018.
- European Commission, *Energy prices and costs in Europe*, 2022.
- GUS, Komunikat o średniorocznym wskaźniku cen nośników energii, Główny Urząd Statystyczny, 2023.
- GUS, *Działalność przedsiębiorstw niefinansowych 2024*. Główny Urząd Statystyczny, 2024.
- GUS, *Wyniki finansowe przedsiębiorstw niefinansowych 2024*. Główny Urząd Statystyczny, 2024. https://stat.gov.pl/files/gfx/portalinformacyjny/pl/defaultaktualnosci/5502/12/56/1/wyniki_finansowe_przedsiębiorstw_niefinansowych.pdf
- Horngren C. T., Datar S. M., Rajan M., *Cost accounting*. Pearson, 2018.
- Kaplan R. S., Norton D. P., *The balanced scorecard: Translating strategy into action*. Harvard Business Press, 1996.
- Kaplan R.S., Anderson S. R., *Time-Driven Activity-Based Costing: A Simpler and More Powerful Path to Higher Profits*, Harvard Business Press, Boston 2007.
- Karnańska, A. (red.). *Rachunkowość zarządcza i rachunek kosztów w systemie informacyjnym przedsiębiorstwa*, Difin, Warszawa 2009.
- Nielsen L. B., Mitchell F., Nørreklit, H., *Management accounting and control systems*. Palgrave Macmillan, 2019.
- Nowak E., *Rachunkowość zarządcza*. Polskie Wydawnictwo Ekonomiczne, 2019.
- OECD, *SME and entrepreneurship outlook 2021*. OECD Publishing, 2021.
- PARP, *Raport o stanie sektora małych i średnich przedsiębiorstw w Polsce 2026*. Polska Agencja Rozwoju Przedsiębiorczości, 2026.
- PKO BP, *Mikroprzedsiębiorstwa 2025*. https://cdn-netpr.pl/file/attachment/2920950/6e/pko_mikroprzedsiębiorstwa_2025.pdf
- Polski Instytut Ekonomiczny, *Rentowność polskich przedsiębiorstw w latach 2020-2024* (X 2025). <https://pie.net.pl/wp-content/uploads/2025/10/Rentownosc-polskich-przedsiębiorstw.pdf>
- Porter M. E., *Competitive advantage: Creating and sustaining superior performance*. Free Press, 2019.
- Samuelson P. A., Nordhaus W. D., *Economics* (20th ed.). McGraw-Hill Education, 2019.
- Sierpińska M., Jachna T., *Ocena przedsiębiorstwa według standardów światowych* (4th ed.). Polskie Wydawnictwo Ekonomiczne, 2018.
- Sobańska I., *Rachunkowość zarządcza*. C.H. Beck, 2018.

Szychta A., Definicja rachunkowości zarządczej w ujęciu ewolucyjnym, Prace Naukowe Uniwersytetu Ekonomicznego we Wrocławiu, 513, 2018.

Wnuk-Pel T., Zastosowanie rachunku kosztów działań w przedsiębiorstwach w Polsce, Wydawnictwo Uniwersytetu Łódzkiego, Łódź 2012.

Wnuk-Pel T., Management accounting systems in SMEs. Zeszyty Teoretyczne Rachunkowości, 2019.

Adres do korespondencji: rafal.kornas@urk.edu.pl

ORCID: Rafał Kornas 0000-0001-8808-7849

ORCID: Elżbieta Olech 0000-0003-4405-701X

PODNOSENIE POZIOMU KSZTAŁCENIA W OBSZARZE INŻYNIERII ROLNICZEJ I ŻYWNOŚCI POPRZECZ INTENSYWNY MIĘDZYNARODOWY PROGRAM KSZTAŁCENIA – STUDIUM PRZYPADKU PROJEKTU „SPECIALIST IN AGRICULTURAL AND FOOD ENGINEERING IN THE CONTEXT OF GREEN AND DIGITAL TRANSFORMATION (TWIN TRANSITION)”

Artur Kraszkiewicz¹, Sławomir Kocira¹, Jacek Ogrodniczek¹, Beata Biernacka², Małgorzata Góral-Kowalczyk³, Marta Czyżykiewicz⁴

¹ Katedra Eksploatacji Maszyn i Zarządzania Procesami Produkcyjnymi, Uniwersytet Przyrodniczy w Lublinie

² Katedra Techniki Ciepłej, Uniwersytet Przyrodniczy w Lublinie

³ Katedra Maszyn Rolniczych, Leśnych i Transportowych, Uniwersytet Przyrodniczy w Lublinie

⁴ Dziekanat Wydziału Inżynierii Produkcji, Uniwersytet Przyrodniczy w Lublinie

Wprowadzenie

Unia Europejska (UE) określiła wyraźne cele zarówno w zakresie zielonej, jak i cyfrowej transformacji. Z jednej strony związane są one z polityką energetyczną i pro środowiskową dla osiągnięcia neutralności klimatycznej, ochrony bioróżnorodności, redukcji zanieczyszczeń i rozwoju gospodarki o obiegu zamkniętym. Z drugiej natomiast z zagadnieniami, które wyznaczają cele dotyczące infrastruktury cyfrowej, umiejętności, usług publicznych i transformacji przedsiębiorstw¹.

Zasadniczo te cele są spójne. Oczekuje się, że technologie cyfrowe będą wspierać efektywność energetyczną, zrównoważone rolnictwo i lepsze zarządzanie środowiskiem. W debacie dotyczącej zrównoważonego rozwoju coraz częściej pojawia się pojęcie podwójnej transformacji (Twin Transition), odnoszące się do równoległych, bliźniaczych procesów transformacji ekologicznej i cyfrowej. Oba te procesy są ze sobą ściśle powiązane: technologie cyfrowe wspierają realizację celów środowiskowych, natomiast zielona transformacja wyznacza kierunki odpowiedzialnego wykorzystania technologii. W praktyce oznacza to konieczność nowego podejścia do kształcenia i rozwoju kompetencji^{2,3,4}.

¹ Kształtowanie transformacji cyfrowej: strategia UE. Pozyskano z: <https://www.europarl.europa.eu/topics/pl/article/20210414STO02010/ksztaltowanie-transformacji-cyfrowej-strategia-ue>

² Podwójna transformacja – modne hasło czy realne wyzwanie? Pozyskano z: <https://wsiz.edu.pl/blog-naukowy/podwojna-transformacja-modne-haslo-czy-realne-wyzwanie/>

³ Tabares S., Parida V., Chirumalla K. Twin Transition in industrial organizations: Conceptualization, implementation framework, and research agenda. *Technological Forecasting and Social Change*, Volume 213, 123995, <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2025.123995>, 2025

Obie transformacje mają priorytetowe znaczenie w polityce UE, a ich realizacja powinna mieć znaczące konsekwencje w przyszłości. Chociaż transformacje mają odmienny charakter, ich jednoczesna, wspólna realizacja może doprowadzić do wzmocnienia ich oddziaływania na zasadzie synergizmu, a w konsekwencji do szybszego osiągnięcia neutralności klimatycznej. Kluczową rolę w osiągnięciu neutralności klimatycznej, ograniczeniu zanieczyszczenia i przywróceniu bioróżnorodności mogą odegrać technologie cyfrowe. Wykorzystanie potencjału transformacji cyfrowej jako procesu sprzyjającego zrównoważonemu rozwojowi może przyspieszyć osiągnięcie celów środowiskowych⁵.

Zmiany klimatyczne, rozwój technologii cyfrowych oraz dynamiczne przeobrażenia rynku pracy powodują, że zielona i cyfrowa transformacja nie mogą być analizowane w oderwaniu od siebie. Efektywność energetyczna, zarządzanie zasobami, analiza danych środowiskowych czy cyfrowe wsparcie procesów decyzyjnych stają się integralnymi elementami współczesnych strategii rozwojowych. W tym kontekście kluczowe znaczenie zyskuje pytanie o kompetencje, jakie powinni posiadać absolwenci uczelni wyższych, pracownicy organizacji oraz kadra zarządzająca, aby aktywnie uczestniczyć w procesach transformacyjnych^{6,7}.

To właśnie na styku tych dwóch procesów — transformacji ekologicznej i transformacji cyfrowej — powstaje nowoczesna inżynieria rolnicza i żywności. Nie jest przypadkiem, że coraz częściej mówi się o konieczności budowania odpornego, inteligentnego i zrównoważonego systemu żywnościowego. Współczesny specjalista nie może być już wyłącznie ekspertem od maszyn, procesów technologicznych czy logistyki produkcji. Musi rozumieć również kwestie środowiskowe, energetyczne, cyfrowe oraz społeczne konsekwencje podejmowanych decyzji.

Dzisiejszy inżynier rolnictwa i żywności powinien potrafić analizować dane pochodzące z sensorów polowych, interpretować obrazy satelitarne, współpracować z systemami sztucznej inteligencji, a jednocześnie rozumieć znaczenie bioróżnorodności, gospodarki obiegu zamkniętego i efektywnego wykorzystania zasobów naturalnych.

Sektor rolno-spożywczy odgrywa fundamentalną rolę w bezpieczeństwie żywnościowym Europy i świata. Jednocześnie jest obszarem, w którym innowacje mogą realnie poprawiać jakość życia milionów ludzi. Technologie precyzyjnego rolnictwa pozwalają ograniczać zużycie nawozów i środków ochrony roślin. Inteligentne systemy monitorowania produkcji zwiększają efektywność energetyczną i ograniczają straty. Cyfrowe modele zarządzania łańcuchami dostaw pomagają redukować marnowanie żywności. Ale warto również zachować pewną ostrożność wobec entuzjazmu technologicznego. Sama cyfryzacja nie rozwiąże wszystkich problemów. Technologie nie są

⁴ Barbero J., Collado L.A., Rodríguez-Crespo E., Santos A.M. The Twin Transition in the Euro-pean Union: assessing regional patterns of EU-funded investments, *European Planning Stud-ies*, 33:10, 1801-1821, <https://doi.org/10.1080/09654313.2025.2528882>, 2025

⁵ Czyżewska-Misztal D., Cabańska J. Podwójna transformacja w UE – stan obecny i wyzwania dla cyfrowej i zielonej Europy. *Zeszyty Naukowe Polskiego Towarzystwa Ekonomicznego w Zielonej Górze*, 19, s. 108-123. DOI: 10.26366/PTE.ZG.2023.249, 2023

⁶ op cit. Podwójna transformacja ...

⁷ Youssef B.A. Twin Transition: Digital Transformation Pathways for Sustainable Innovation. *Sustainability* 17, 9491. <https://doi.org/10.3390/su17219491>, 2025

neutralne — wymagają kompetencji, odpowiedzialności i krytycznego myślenia. Automatyzacja może zwiększać wydajność, ale może też pogłębiać nierówności. Algorytmy mogą wspierać decyzje, ale nie zastąpią wiedzy eksperckiej ani odpowiedzialności człowieka. Dlatego tak istotne jest kształcenie specjalistów, którzy będą potrafili nie tylko obsługiwać nowoczesne narzędzia, lecz także rozumieć ich ograniczenia i konsekwencje.

Celem pracy było przedstawienie głównych działań podjętych przy realizacji projektu NAWA Spinaker w zakresie tworzenia i realizacji mikroprogramu kształcenia z obszaru inżynierii rolniczej i żywności pod kątem realizacji koncepcji zielonej i cyfrowej transformacji (Twin Transition).

Charakterystyka projektu

Program NAWA Spinaker wspiera uczelnie i instytucje naukowe w tworzeniu oraz realizacji intensywnych międzynarodowych programów kształcenia (IMPK) prowadzonych w językach obcych. Są to krótkie formy edukacyjne – np. szkoły letnie i zimowe, kursy specjalistyczne, szkolenia czy wizyty studyjne – które zwiększają atrakcyjność polskich uczelni w oczach studentów, doktorantów i kadry akademickiej z zagranicy. Program kierowany jest do studentów, doktorantów i pracowników zagranicznych uczelni oraz instytucji naukowych, którzy chcą rozwijać swoje kompetencje w ramach krótkich, intensywnych form kształcenia prowadzonych w Polsce. Uczestnikami mogą być także studenci, doktoranci i pracownicy instytucji składającej wniosek.

Celem projektu realizowanego na Wydziale Inżynierii Produkcji (WIP) Uniwersytetu Przyrodniczego w Lublinie (UPL) było podniesienie jakości oraz zwiększenie poziomu umiędzynarodowienia kształcenia na WIP UPL poprzez opracowanie i uruchomienie IMPK w formie interdyscyplinarnego kursu dokształcającego, w którym udział przewidziano dla zagranicznych studentów, doktorantów oraz pracowników uczelni, co miało przyczynić się nie tylko do zwiększenia wiedzy i umiejętności uczestników/czek kursu, ale przede wszystkim do wzrostu atrakcyjności oraz zainteresowania ofertą edukacyjną WIP UPL za granicą, zwiększenia umiejętności i kwalifikacji kadry UPL oraz zbudowania wiedzy i doświadczenia instytucjonalnego, pozwalających na uruchamianie kolejnych IMPK w UPL w dłuższej perspektywie.

Cele szczegółowe tych działań to:

- Opracowanie i wdrożenie do oferty dydaktycznej UPL (wraz z przeprowadzeniem edycji pilotażowej) jednego IMPK przewidzianego do realizacji jako kurs specjalistyczny z obszaru inżynierii rolniczej i żywności,
- Przeszkolenie kadry UPL (kadra prowadząca zajęcia w ramach IMPK) z zakresu analizy danych, modelowania, optymalizacji i wizualizacji zrównoważonych procesów produkcyjnych w rolnictwie 4.0, co z aktualizuje i zwiększy kompetencje kadry w zakresie intensywnie rozwijających się zagadnień związanych z cyfrową transformacją,
- Zebranie i upowszechnienie wśród kadry UPL dobrych praktyk z zakresu opracowania i uruchomienia IMPK, a także wdrożenie w UPL regulacji wewnętrznych, m.in. w zakresie mikropoświadczeń, umożliwiających realizację kolejnych IMPK.

Nie bez znaczenia są również cele długoterminowe projektu, które zdefiniowano jako:

- Rozbudowanie oferty UPL o kolejne IMPK oraz wzrost udziału przedstawicieli zagranicznych ośrodków także w innych w programach kształcenia w UPL,
 - Zwiększenie zainteresowania ofertą kształcenia UPL i powiązanymi z nią badaniami wśród zagranicznych młodych naukowców, którzy podczas realizacji IMPK zapoznają się z zapleczem badawczym UPL (aparaturą i sprzętem laboratoryjnym) co może skutkować wspólnymi projektami naukowymi i publikacjami,
 - Wzmocnienie obecności polskiej nauki i szkolnictwa wyższego na arenie międzynarodowej, jak również ułatwienie międzynarodowego transferu wiedzy oraz umiejętności do nauki i gospodarki,
 - Promocja wymiany międzykulturowej i popularyzacja kultury polskiej za granicą.
- Niniejsze cele przewidziano do realizacji w podziale na poszczególne działania (wyodrębniono 5) w ramach których wyszczególniono 6 zadań:
- Działanie 1 – Tworzenie IMPK – działania związane z tworzeniem IMPK w formule stacjonarnej:
 - Zadanie 1 – przygotowanie dokumentacji projektowej, procedur i zasad stosowania „mikropoświadczeń” oraz uruchomienie projektu w UPL;
 - Zadanie 2 – opracowanie programu kursu specjalistycznego pn. Specialist in Agricultural and Food Engineering in the context of Green and Digital Transformation (Twin Transition).
 - Działanie 2 – Tworzenie IMPK – podnoszenie kompetencji kadry potrzebnych do tworzenia lub realizacji IMPK (organizacja lub udział kadry biorącej udział w Projekcie w szkoleniach, wizytach studyjnych lub spotkaniach roboczych w kraju lub za granicą):
 - Zadanie 3 – Podniesienie kompetencji kadry w zakresie tworzenia i realizacji modułów kształcenia z zakresu tematyki kursu.
 - Działanie 3 – Realizacja IMPK – rekrutacja Uczestników IMPK:
 - Zadanie 4 – Rekrutacja uczestników pilotażowej edycji IMPK z zagranicy i Polski.
 - Działanie 4 – Realizacja IMPK – działania związane z realizacją IMPK (w tym organizacja wykładów i zajęć):
 - Zadanie 5 – Realizacja pilotażowej edycji kursu pn. “Specialist in Agricultural and Food Engineering in the context of the Green and Digital Transformation (Twin Transition)”.
 - Działanie 5 – Realizacja IMPK – weryfikacja efektów uczenia się uzyskanych przez Uczestników Projektu (studentów/-ki, doktorantów/-ki, kadre) IMPK:
 - Zadanie 6 – Weryfikacja i analiza uzyskanych efektów uczenia się oraz upowszechnienie rezultatów projektu.

Metodyka realizacji programu kursu

Celem opracowania była analiza podstaw metodycznych projektowania programu kursu na podstawie sformułowanych efektów uczenia się. Podczas realizacji tych prac przyjęto wytyczne określone są przez Krajowe Ramy Kwalifikacji na poziomie centralnym (dla wyodrębnionych obszarów kształcenia wynikające także z analizy potrzeb kompetencyjnych). Dodatkowo proces ten regulowany był odpowiednimi przepisami –

w tym przypadku na UPL „Regulaminem kształcenia specjalistycznego i innych form kształcenia”⁸.

Sektor rolniczo-żywnościowy w Europie stoi obecnie przed dwiema równoległymi transformacjami: zieloną (zielony ład - green deal, gospodarka obiegu zamkniętego - GOZ) oraz cyfrową (rolnictwo precyzyjne, sztuczna inteligencja, internet rzeczy, analiza danych). Procesy te powodują istotne zmiany w strukturze kompetencji wymaganych od pracowników, menedżerów i przedsiębiorców funkcjonujących w całym łańcuchu żywnościowym⁹.

Zielona transformacja wymaga od pracowników sektora wiedzy dotyczącej zrównoważonego gospodarowania zasobami naturalnymi, ograniczania emisji gazów cieplarnianych, ochrony bioróżnorodności oraz wdrażania zasad gospodarki obiegu zamkniętego. Coraz większego znaczenia nabierają umiejętności związane z: efektywnym wykorzystaniem energii i surowców, zarządzaniem środowiskowym, produkcją ekologiczną, oceną śladu węglowego produktów, wdrażaniem praktyk klimatycznie inteligentnego rolnictwa (Climate Smart Agriculture), zarządzaniem odpadami i recyklingiem w przemyśle spożywczym. Badania europejskie wskazują, że kompetencje z zakresu zrównoważonego rozwoju należą obecnie do najważniejszych potrzeb szkoleniowych. Szczególnie cenione są umiejętności związane z efektywnym gospodarowaniem zasobami, planowaniem strategicznym oraz zapewnieniem jakości i bezpieczeństwa żywności^{10,11}.

Natomiast cyfryzacja rolnictwa i przemysłu spożywczego prowadzi do wzrostu znaczenia kompetencji technologicznych. Nowoczesne przedsiębiorstwa coraz częściej wykorzystują: systemy monitoringu produkcji, technologie Internetu Rzeczy (IoT), sztuczną inteligencję (AI), analizę dużych zbiorów danych (Big Data), robotyzację i automatyzację procesów, systemy wspomagania decyzji, narzędzia cyfrowej identyfikowalności produktów. W konsekwencji rośnie zapotrzebowanie na kompetencje cyfrowe obejmujące obsługę zaawansowanych technologii, analizę danych, cyberbezpieczeństwo, zarządzanie informacją oraz wykorzystanie narzędzi AI w procesach produkcyjnych i logistycznych. Według prognoz Europejskiego Centrum Rozwoju Szkolenia Zawodowego (CEDEFOP) wdrażanie strategii cyfrowej UE będzie wymagało znaczących inwestycji w rozwój kompetencji cyfrowych pracowników wszystkich sektorów gospodarki, w tym sektora rolno-spożywczego¹².

Oprócz kompetencji technicznych rośnie znaczenie kompetencji miękkich. Badania wskazują szczególnie na potrzebę rozwijania: umiejętności rozwiązywania proble-

⁸ Załącznik do uchwały nr 62/2018-2019 Senatu UP w Lublinie z dnia 26 kwietnia 2019 r. Po-zyskano z: https://www.up.lublin.pl/files/ksztalcenie/2016/regulamin_kurs_2019.pdf

⁹ Altybayeva A., Rakhimzhanovb A., Zhanbyrbayevc A., Issayevad Z., Bekmukhamedove B. The state and prospects of digital transformation in the agricultural sectors. *Agricultural Engineering Vol. 29, No.1*, pp. 287-309 DOI: 10.2478/agriceng-2025-0017, 2025

¹⁰ European Commission – Digitalisation of Agriculture and Rural Areas. Pozyskano z: https://agriculture.ec.europa.eu/overview-vision-agriculture-food/digitalisation_en

¹¹ Umiejętności i zmieniające się społeczeństwa. Pozyskano z: <https://www.cedefop.europa.eu/pl/themes/skills-changing-societies>

¹² Ścieżka przejściowa dla ekosystemu przemysłu rolno-spożywczego. Pozyskano z: https://single-market-economy.ec.europa.eu/sectors/agri-food-industrial-ecosystem/transition-pathway-agri-food-industrial-ecosystem_en

mów, myślenia strategicznego, zarządzania zmianą, komunikacji i współpracy międzysektorowej, przedsiębiorczości, zdolności adaptacyjnych i uczenia się przez całe życie. Jednocześnie ważne jest, że transformacja sektora rolniczego i przetwórstwa żywności wymaga bowiem nie tylko wdrażania nowych technologii, lecz także zmiany modeli biznesowych i organizacyjnych.

Dostępne badania wskazują na występowanie wyraźnej luki kompetencyjnej pomiędzy potrzebami rynku pracy a ofertą edukacyjną. Respondenci europejskich badań podkreślają, że zarówno kształcenie formalne, jak i nieformalne nie nadąża za tempem zmian technologicznych i środowiskowych zachodzących w sektorze. Szczególnie widoczny jest niedobór specjalistów łączących wiedzę rolniczą z kompetencjami cyfrowymi i środowiskowymi. Dlatego, przyszły rozwój tego sektora będzie zależał od zdolności kształcenia kadr wyposażonych w kompetencje zielone, cyfrowe oraz interdyscyplinarne. Kluczowe znaczenie będą miały umiejętności związane z wykorzystaniem technologii cyfrowych, zarządzaniem zrównoważonym rozwojem, analizą danych oraz adaptacją do dynamicznych zmian rynkowych i regulacyjnych. Rozwój tych kompetencji powinien stać się jednym z głównych kierunków polityki edukacyjnej i szkoleniowej wspierającej transformację sektora rolno-spożywczego^{13,14,15,16,17}.

Powołany w ramach projektu kurs dokształcający kierowany jest do studentów, doktorantów oraz pracowników uczelni z zagranicy i Polski. Założono, że w formie stacjonarnej, w wymiarze 60 godz. dydaktycznych (4 ECTS) zrealizowane będą zajęcia o profilu ogólnoakademickim. Opracowując założenia tego programu zwrócono uwagę na drugi stopień Polskiej Ramy Kwalifikacji PRK na poziomie 6-7. Założono, że główne realizowane treści będą zgodne z Sektorową Ramą Kwalifikacji dla przetwórstwa żywności. Dodatkowo przyporządkowując je do podgrupy klasyfikacji ISCED - 072 Podgrupa produkcji i przetwórstwa lub 081 Podgrupa rolnicza. Natomiast w kontekście dyscyplin naukowych do której odnoszą się efekty uczenia się treści kursu przypisano do Inżynierii Środowiska, Górnictwa i Energetyki oraz Inżynierii Mechanicznej. Na tej podstawie opracowano następujący opis osiągniętych efektów uczenia się:

Wiedza: Uczestnik Projektu/kursu zna i rozumie: nowoczesne technologie, procesy i metody stosowane w naukach rolniczych i żywnościowych, obejmujące aktualne kierunki badań i rozwoju zwłaszcza w zakresie zielonej i cyfrowej transformacji; zasady funkcjonowania systemów technologicznych i biologicznych w kontekście zrównoważonego rozwoju, ekoenergii, gospodarki obiegu zamkniętego, bezpieczeństwa żywności oraz ochrony środowiska; w pogłębiony sposób zależności między czynnikami biolo-

¹³ Zaspokajanie potrzeb w zakresie umiejętności niezbędnych do zielonej transformacji. Pozyskano z: <https://www.cedefop.europa.eu/en/publications/4220>

¹⁴ Digital skills ambitions in action. Cedefop's skills forecast digitalisation scenario. Pozyskano z: <https://www.cedefop.europa.eu/pl/publications/4218>

¹⁵ Ramalho R.A., Goodburn B., Mayor L., Lindner L.F., Knöbl C.F. Trienekens J., Rossi D., Sanna F., Berruto R., Busato P. Skill Needs for Sustainable Agri-Food and Forestry Sectors (II): Insights of a European Survey. Sustainability 15, 4115. <https://doi.org/10.3390/su15054115>, 2023

¹⁶ Bertoglio R., Corbo C., Renga F.M., Matteucci M. The Digital Agricultural Revolution: A Bibliometric Analysis Literature Review. DOI: 10.1109/ACCESS.2021.3115258, 2021

¹⁷ Strategic Dialogue on the Future of EU Agriculture. European Commission 2024. Pozyskano z: https://commission.europa.eu/topics/agriculture-and-rural-development/strategic-dialogue-future-eu-agriculture_en

gicznymi, chemicznymi, technologicznymi i ekonomicznymi wpływającymi na efektywność procesów w rolnictwie i przemyśle spożywczym; metody i teorie pozyskiwania, analizy i interpretacji danych oraz zasady oceny ryzyka, jakości i innowacyjności rozwiązań technologicznych.

Umiejętności: Uczestnik Projektu/kursu potrafi: samodzielnie identyfikować, analizować i rozwiązywać problemy technologiczne, środowiskowe i organizacyjne w obszarze rolnictwa i przetwórstwa żywności, wykorzystując wiedzę interdyscyplinarną; dobierać, stosować i krytycznie oceniać nowoczesne metody, narzędzia badawcze oraz technologie wykorzystywane w gospodarce rolno-spożywczej i analizie żywności w tym w zakresie ekoenergii i gospodarki obiegu zamkniętego; opracowywać, analizować i interpretować dane eksperymentalne lub produkcyjne z użyciem narzędzi informatycznych, statystycznych i cyfrowych, wyciągając uzasadnione wnioski praktyczne; przygotować, raport lub prezentację wyników badań i potrafi argumentować swoje stanowisko w dyskusji z wykorzystaniem aktualnej wiedzy.

Kompetencje społecznych: Uczestnik Projektu/kursu jest gotów do: krytycznej oceny posiadanej wiedzy i wpływu podejmowanych działań zawodowych na środowisko, zdrowie i społeczeństwo oraz przestrzegania zasad obowiązujących w dziedzinie działalności zawodowej; efektywnej współpracy w zespole interdyscyplinarnym, komunikować się z przedstawicielami różnych branż (rolnictwo, przemysł, administracja) oraz inicjacji działań na rzecz interesu publicznego.

Efekty uczenia się zostały zaprojektowane w odpowiedzi na potrzeby kompetencyjne sektora rolno-spożywczego wynikające z realizacji celów proekologicznych oraz cyfrowej transformacji rolnictwa. Obejmują one rozwój kompetencji związanych ze zrównoważonym gospodarowaniem zasobami, gospodarką obiegu zamkniętego, ochroną środowiska, ekoenergią, bezpieczeństwem żywności oraz wykorzystaniem technologii cyfrowych, analizy danych i nowoczesnych narzędzi wspierających procesy produkcyjne i decyzyjne przy prowadzeniu produkcji rolniczej i żywności.

Ze względu na interdyscyplinarność oraz złożoność tematyki transformacji bliźniaczej, zajęcia realizowane podczas kursu podzielono na 20 modułów, po 3 godz., zajęć i były to następujące przedmioty: Gospodarka danymi cyfrowymi w gospodarstwach rolniczych, Wykorzystanie dronów w rolnictwie precyzyjnym, Biostymulatory, Zagrożenia podczas stosowania pestycydów, Systemy jakości, Gospodarka obiegu zamkniętego, Biopaliwa, Eksploatacja odnawialnych źródeł energii, Niekonwencjonalne metody zagospodarowania roślinnych surowców odpadowych, Rolnictwo regeneratywne, Procesy chłodnicze w przetwórstwie i konserwacji produktów rolniczych i żywności, Mikrobiologia żywności, Nowoczesne metody przetwarzania żywności 1, Nowoczesne metody przetwarzania żywności 2, Opakowania, Niekonwencjonalne metody utrwalania żywności ich wpływ na zdrowie człowieka i środowisko, Liofilizacja żywności: Za i przeciw, System jakości żywności HACCP, Liofilizowane dodatki do żywności, Analizy chemiczne żywności.

Obsadę personalną zgodnie z funkcjonującym na WIP UPL Systemem Jakości Kształcenia wytypowano na podstawie Kart Nauczyciela w których zamieszczone są kompetencje i doświadczenie od kątem treści kursu. Ze względu na standardy funkcjonujące na UPL w zakresie struktury zajęć – wymiar wykładów do ćwiczeń to 1 godz. wykładów i 2 godz. ćwiczeń. Dodatkowo w wymiarze 10 godz. wybranych zajęć przewidziano ich realizację w terenie. Były to: Biostymulatory, Zagrożenia podczas stoso-

wania pestycydów, Gospodarka obiegu zamkniętego, Biopaliwa, Eksploatacja odnawialnych źródeł energii. Podczas tych zajęć Absolwent tego kursu dokształcającego zdobędzie interdyscyplinarną wiedzę, umiejętności i kompetencje na styku nowoczesnych technologii rolniczych, przetwórstwa żywności, inżynierii środowiska oraz gospodarki o obiegu zamkniętym, jednocześnie będąc zdolnym do krytycznej oceny i wdrażania innowacji w kontekście realnych ograniczeń technologicznych, ekonomicznych i środowiskowych w zakresie zielonej i cyfrowej transformacji. Program IMPK zapewnia interdyscyplinarne wykształcenie połączone ze specjalistyczną wiedzą z zakresu inżynierii rolniczej i żywności, dając przygotowanie do kreatywnego rozwiązywania zadań w aspekcie zrównoważonego zarządzania środowiskiem wykorzystując jednocześnie nowoczesne metody badawcze. Dodatkowo Absolwent będzie dysponował szczegółową wiedzą z zakresu badania, analizy surowców, realizacji procesów technologicznych i wytwarzanych produktów w kontekście wymagań zielonej i cyfrowej transformacji. W swoich działaniach Absolwent zachowywał będzie odpowiednie standardy bezpieczeństwa i higieny, a w działaniach będzie kierował się zasadami etyki i odpowiedzialności.

System oceny uczestników a ocena osiągniętych rezultatów

Kurs rozpoczęło 38 uczestników, w tym 16 Kobiet i 22 mężczyzn. Z zagranicy było 29 słuchaczy w tym 5 nauczycieli akademickich, 8 doktorantów i 16 studentów. Były to osoby, które reprezentowały ośrodki akademickie z Włoch, Albanii, Turcji, Ukrainy, Rumunii, Czech, Słowenii, Węgier, Hiszpanii i Portugalii. Natomiast z UPL w zajęciach brało udział 9 uczestników w tym 2 pracowników, 2 doktorantów i 5 studentów. W zakresie specjalności kształcenia lub profilu naukowego łącznie z zagranicy i Polski byli to reprezentanci inżynierii rolniczej (22 os.), inżynierii żywności (9 os.) i pozostałych kierunków inżynierskich o specjalnościach okołorolniczych (7 os.).

Zastosowany podczas kursu system oceniania weryfikujący efekty uczenia się został przygotowany zgodnie z instrukcją WIP UPL dotyczącą jakości kształcenia i systemu oceniania¹⁸. Weryfikacja efektów uczenia się została przeprowadzona w sposób adekwatny do nabytych kompetencji, przy jednoczesnym zachowaniu zasad zapewniających rozdzielenie procesu uczenia się od walidacji (osobą weryfikującą efekty uczenia się nie była osoba prowadząca zajęcia).

W celu zapewnienia rzetelnej ewaluacji efektów kształcenia na początku IMPK uczestnicy/czki zostali poproszeni o wypełnienie pre-testu (20 pytań kontrolnych), który pozwolił oszacować ich wejściowy poziom wiedzy i kompetencji. Natomiast na koniec kursu system poświadczania wiedzy, umiejętności i kompetencji składał się z całościowego egzaminu końcowego w formie post-testu (30 pytań) weryfikującego ostatecznie wiedzę i umiejętności nabyte przez uczestników IMPK oraz 2 zadań otwartych weryfikujących praktyczno-analityczne podejście do zdobytych umiejętności.

Pre-test obejmował 20 pytań i koncentrował się na pięciu głównych obszarach: technologiach chłodniczych i liofilizacji, systemach jakości i HACCP, rolnictwie precy-

¹⁸ Instrukcja weryfikacji efektów kształcenia na Wydziale Inżynierii Produkcji Uniwersytetu Przyrodniczego w Lublinie. Pozyskano z: https://www.up.lublin.pl/files/wip/jakosc-ksztalcenia/instrukcje/wipjk_1_instrukcja_weryfikacji_efektow_ksztalcenia.pdf

zynym i technologiach dronowych, bioenergii i gospodarce obiegu zamkniętego, zielonej i cyfrowej transformacji sektora rolno-spożywczego. Pytania te miały głównie charakter: definicyjny, rozpoznawczy i sprawdzający podstawową wiedzę faktograficzną. Egzamin ten miał na celu ocenę wiedzy początkowej uczestników przed rozpoczęciem szkolenia. Liczba uczestników egzaminu wstępnego to 38 osób. Średni wynik: 70%. Mediana: 70%. Odchylenie standardowe: 17%. Wynik minimalny: 15%. Wynik maksymalny: 90%. Uzyskane wyniki wskazują na znaczne zróżnicowanie poziomu wiedzy uczestników przed rozpoczęciem kursu. Część osób posiadała już stosunkowo wysokie kompetencje w obszarze technologii rolno-spożywczych, jakości żywności, bioenergii oraz rolnictwa precyzyjnego, podczas gdy inni rozpoczynali szkolenie z niewielką wiedzą w zakresie omawianych zagadnień.

Egzamin końcowy w części post-testu zawierał wszystkie główne obszary obecne w pre-teście, ale dodatkowo rozszerzono jego zakres o: proces ekstruzji, alternatywne źródła białka, biostymulatory, kalibrację opryskiwaczy, materiały opakowaniowe i ich właściwości, analizę danych w środowisku R, bardziej szczegółowe zagadnienia liofilizacji. Zabieg ten był celowy, nawiązując do charakteru specjalistycznych treści realizowanych podczas kursu. Pytania te wymagały nie tylko znajomości pojęć, ale również: rozumienia procesów technologicznych, umiejętności identyfikacji zastosowań, podstawowej interpretacji danych cyfrowych. Dodatkowo słuchacze kursu podczas egzaminu końcowego mieli do rozwiązania dwa zadania problemowe, otwarte. Pierwsze dotyczyło rolnictwa precyzyjnego a drugie systemów HACCP. Liczba uczestników piszących egzamin końcowy to 38 osób. Średni wynik: 92%. Mediana: 93%. Odchylenie standardowe: 6%. Wynik minimalny: 80%. Wynik maksymalny: 100%.

Zestawienie różnicy trudności egzaminów przedstawiono w tabeli 1. Ogólny wskaźnik trudności całego testu obliczono jako średnią arytmetyczną wskaźników trudności wszystkich zadań wchodzących w jego skład. W praktyce edukacyjnej najczęściej wylicza się go poprzez podzielenie sumy wszystkich punktów zdobytych przez zdających przez sumę wszystkich możliwych do zdobycia punktów¹⁹.

Tabela 1. Zestawienie różnicy trudności egzaminu wstępnego i końcowego

Kryterium	Egzamin wstępny (Pre-test)	Egzamin końcowy (Post-test)
Liczba obszarów tematycznych	średnia	wysoka
Poziom wiedzy faktograficznej	wysoki udział	umiarkowany udział
Pytania aplikacyjne	niewiele	więcej
Pytania technologiczne specjalistyczne	umiarkowanie	wyrażnie więcej
Elementy cyfrowe i analityczne	podstawowe	rozszerzone
Ogólna trudność dla uczestników kursu	70%	91%

Źródło: opracowanie własne

¹⁹ Mitra N.K, Nagaraja H.S, Ponnudurai G, Judson J.P. The Levels Of Difficulty And Discrimination Indices In Type A Multiple Choice Questions Of Pre-clinical Semester. Multidisciplinary Summative Tests. IeJSME 3 (1): 2-7. DOI:10.56026/imu.3.1.2,

Egzamin końcowy w formie post-testu i zadań problemowych był zauważalnie trudniejszy od pre-testu. Różnica odpowiadała logice pomiaru efektów uczenia się, gdzie test końcowy powinien weryfikować nie tylko wiedzę początkową, ale również wiedzę i kompetencje zdobyte podczas kursu. Istotne jest tutaj, że odzwierciedlenie tematyki kursu z obszaru „zielonych technologii” w testach zrealizowano m.in. przez zagadnienia z takich obszarów jak: bioetanol i biogaz, biopaliwa II generacji, HACCP, zrównoważone łańcuchy dostaw, efektywność energetyczna, ograniczanie wpływu środowiskowego produkcji, gospodarka obiegu zamkniętego. Pytania z tego obszaru stanowiły około 35% pytań. Natomiast z obszaru „transformacja cyfrowa” pytania reprezentowane były przez tematykę dotyczącą: dronów i danych multispektralnych, rolnictwa precyzyjnego, systemów monitorowania procesów, analizy danych w środowisku R. Zagadnienia te stanowiły około 25% pytań. W kontekście tych treści nie bez znaczenia jest obszar “inżynierii rolniczej i żywności”, który reprezentowany był przez zagadnienia z: chłodnictwa, liofilizacji, ekstruzji, oprysków, technologii opakowań, systemów jakości, procesów przetwórstwa żywności. Pytania te stanowiły około 40% wszystkich pytań. Nie mniej jednak przy tak zróżnicowanych zagadnieniach trudność egzaminu końcowego dla uczestników wynosiła 91% a wstępnego 70%.

Odnosząc się do typowych efektów uczenia się kursu w aspekcie transformacji bliźniaczej, uczestnik powinien: rozumieć nowoczesne technologie produkcji rolnej i przetwórstwa żywności, znać zasady transformacji ekologicznej, wykorzystywać technologie cyfrowe wspierające produkcję, rozumieć systemy jakości i bezpieczeństwa żywności, oceniać rozwiązania zwiększające efektywność i zrównoważenie produkcji. Zestawienie to przedstawiono w tabeli 2.

Tabela 2. Tematyka pytań w odniesieniu do efektów uczenia się

Grupa treści efektów uczenia się	Stopień pokrycia
Technologie rolno-spożywcze	bardzo wysoki
Systemy jakości i HACCP	wysoki
Rolnictwo precyzyjne	bardzo wysoki
Cyfryzacja procesów	wysoki
Bioenergia i GOZ	wysoki
Analiza danych cyfrowych	umiarkowany
Zarządzanie transformacją Twin Transition	umiarkowany

Źródło: opracowanie własne

Egzaminy wstępny i końcowy były spójne z tematyką kursu oraz obejmowały kluczowe obszary zielonej i cyfrowej transformacji sektora rolno-spożywczego. Egzamin końcowy był wyraźnie bardziej wymagający i lepiej odzwierciedlał specjalistyczne efekty uczenia się osiągnięte podczas kursu. Najsilniej reprezentowane były zagadnienia inżynierii żywności, rolnictwa precyzyjnego oraz systemów jakości, natomiast stosunkowo słabiej uwzględniał kompetencje związane z analizą strategiczną, oceną wdrożeń i podejmowaniem decyzji w środowisku transformacji Twin Transition.

Doświadczenia i dobre praktyki

Uczestnicy i Uczestniczki kursu wypełnili ankiety ewaluacyjne odpowiadając na następujące pytania: Czy w/w Kurs spełnił Pani/Pana oczekiwania?; Czy w czasie zajęć zdobył(a) Pani/Pan zasób nowej wiedzy i umiejętności?; Na ile wiedza i umiejętności zdobyte podczas Kursu są wykorzystywane przez Panią/Pana w pracy zawodowej (wypełniają osoby pracujące); W jakim stopniu studia wyposażyły Panią/Pana w wiedzę i umiejętności poszukiwane przez pracodawców (wypełniają osoby niepracujące); Jak ocenia Pani/Pan dobór kadry naukowo-dydaktycznej na w/w Kurs; Jak ocenia Pani/Pan warunki lokalowe, wyposażenie sal i laboratoriów na w/w Kursie; Jak ocenia Pani/Pan jakość zajęć podczas w/w Kursu; Jak ocenia Pani/Pan przydatność przekazywanych treści podczas w/w Kursu; Jak ogólnie ocenia Pani/Pan proporcje między zajęciami teoretycznymi, a praktycznymi; Czy zadaniem Pani/Pana program kształcenia należy uzupełnić o dodatkowe zagadnienia?; Czy zdaniem Pani/Pana niektóre zagadnienia powinny być szerzej omawiane; Czy zdaniem Pani/Pana część zagadnień jest mało przydatna w pracy zawodowej; Jak ocenia Pani/Pan obsługę organizacyjną podczas w/w Kursu, oraz poziom przygotowania kadry; Jak ocenia Pani/Pan obsługę organizacyjną podczas w/w Kursu; Czy ma Pani/Pan inne spostrzeżenia dotyczące w/w Kursu?

Na podstawie analizy zgromadzonych wyników z ankiet można stwierdzić, że kurs został oceniony bardzo wysoko przez uczestników. Wszyscy respondenci (100%) zadeklarowali, że kurs spełnił ich oczekiwania oraz pozwolił im zdobyć nową wiedzę i umiejętności. Świadczy to o wysokiej jakości programu kształcenia oraz jego zgodności z potrzebami uczestników. Ocena przydatności zdobytej wiedzy i umiejętności w pracy zawodowej również była bardzo korzystna. Większość osób (odpowiadały nie tylko te pracujące) oceniła ten aspekt na najwyższym poziomie (21 ocen „5” oraz 8 ocen „4”), co wskazuje na praktyczny charakter kursu i możliwość wykorzystania zdobytych kompetencji w codziennej pracy. Podobnie osoby niepracujące uznały, że kurs w znacznym stopniu wyposażył je w wiedzę i umiejętności poszukiwane przez pracodawców.

Bardzo wysoko oceniono kadrę naukowo-dydaktyczną, warunki lokalowe, wyposażenie sal i laboratoriów oraz jakość prowadzonych zajęć. Dominowały oceny bardzo dobre (5) i dobre (4), przy całkowitym braku ocen negatywnych. Szczególnie pozytywnie oceniono organizację kursu oraz przygotowanie kadry, co potwierdza sprawne funkcjonowanie procesu dydaktycznego.

Uczestnicy wysoko ocenili także przydatność przekazywanych treści. W pytaniu dotyczącym proporcji między zajęciami teoretycznymi a praktycznymi zdecydowana większość respondentów uznała je za odpowiednie (33 osoby), a jedynie 5 osób wskazało na zbyt duży udział praktyki. Nikt nie uznał, że kurs zawierał zbyt dużo teorii.

Analiza pytań otwartych wykazała, że większość uczestników nie widziała potrzeby uzupełniania programu o dodatkowe zagadnienia ani szerszego omawiania wybranych tematów. Jedynie pojedyncze osoby zgłaszały takie sugestie, co może stanowić wskazówkę do dalszego doskonalenia programu. Tutaj zwrócono uwagę na możliwość zwiększenia udziału treści z obszaru transformacji cyfrowej. Większość respondentów nie uważała również, aby część realizowanych zagadnień była mało przydatna w pracy zawodowej.

Podsumowując, wyniki ankiety potwierdzają bardzo wysoki poziom satysfakcji uczestników z realizowanego kursu. Kurs został oceniony jako wartościowy pod względem merytorycznym i organizacyjnym, a zdobyta wiedza i umiejętności były postrzegane jako użyteczne zarówno na rynku pracy, jak i w rozwoju zawodowym uczestników. Natomiast zgłaszane przez nielicznych respondentów stanowiły cenne źródło informacji przy planowaniu doskonalenia programu kształcenia.

Ocena realizacji zajęć przez osoby odpowiedzialne za moduł realizowane były w oparciu o przyjęte na WIP UPL standardy w tym zakresie, zdefiniowane w Wydziałowej Księdze Jakości Kształcenia – zał. 1. Kryteria oceny zdefiniowane w tym dokumencie dotyczą następujących kryteriów: Ogólna ocena realizacji efektów uczenia się dla modułu (wiedza, umiejętności, kompetencje), Forma prowadzenia zajęć (audytoryjne/laboratoryjne), Baza lokalowa (wielkość sali/środki dydaktyczne), Wyposażenie laboratoriów, Liczebność grup, Sekwencja modułów, Pora zajęć, Inne (w zależności od specyfiki modułu). We wszystkich wypełnionych ankietach prowadzący ocenili, że: zakładane efekty uczenia się zostały osiągnięte, studenci osiągnęli efekty w wysokim lub pełnym stopniu oraz nie zgłoszono istotnych problemów związanych z realizacją celów dydaktycznych. Był to najbardziej jednoznaczny i powtarzalny wniosek w całym zestawie danych. W kontekście formy prowadzenia zajęć dominowały: wykłady, ćwiczenia audytoryjne, ćwiczenia laboratoryjne, zajęcia terenowe. Przy czym Prowadzący oceniali zastosowane formy jako adekwatne do osiągnięcia efektów uczenia się. Baza lokalowa jako ocena infrastruktury została oceniona zdecydowanie pozytywnie; sale wykładowe określano jako wystarczające, laboratoria umożliwiały realizację zajęć, środki dydaktyczne były odpowiednie do prowadzonych ćwiczeń. W opiniach nie pojawiają się sygnały o brakach lokalowych utrudniających realizację modułów. Pozytywna ocena utrzymana była również w zakresie wyposażenia laboratoriów; większość odpowiedzi wskazała, że: wyposażenie było wystarczające, aparatura była adekwatna do celów zajęć, nie zgłoszono istotnych problemów sprzętowych.

Natomiast w zakresie liczebności grup to jedyny obszar, w którym pojawiają się uwagi krytyczne. Część prowadzących uznała liczebność grup za odpowiednią, jednak w kilku ankietach wskazano, że: grupa licząca około 40 osób jest zbyt duża do efektywnej realizacji części zajęć laboratoryjnych. Może to sugerować potrzebę podziału większych grup podczas ćwiczeń praktycznych.

W zakresie kryterium „Sekwencja modułów” oceny były niemal jednogłośnie pozytywne - kolejność modułów uznano za właściwą, spełnione są wymagania wstępne pomiędzy przedmiotami, nie zgłoszono problemów organizacyjnych wynikających z układu programu. Również „Pora zajęć” była oceniona dość jednoznacznie - Prowadzący ocenili harmonogram jako - odpowiedni, nieutrudniający osiągania efektów uczenia się. W opiniach nie pojawiły się powtarzające się zastrzeżenia dotyczące terminów zajęć. W ostatnim kryterium „Inne uwagi” w większości przypadków wpisano brak dodatkowych uwag oraz wskazywano na pozytywny wpływ międzynarodowego charakteru grup. Dodatkowo nie odnotowano problemów wymagających interwencji.

Ogólny obraz realizacji zajęć w ocenie prowadzących zajęcia był bardzo pozytywny. Prowadzący zgodnie potwierdzili osiągnięcie efektów uczenia się oraz odpowiednie warunki organizacyjne i infrastrukturalne. Jedynym powtarzającym się problemem była zbyt duża liczebność części grup, szczególnie w kontekście zajęć laboratoryjnych. Poza tym nie odnotowano istotnych barier wpływających na jakość kształcenia.

Podsumowanie

Analiza zgromadzonego podczas realizacji projektu zbioru informacji wykazała rosnące znaczenie kompetencji Twin Transition dla sektora inżynierii rolniczej i żywności. Pracodawcy coraz częściej poszukują specjalistów, którzy łączą wiedzę techniczną z zakresu rolnictwa i przetwórstwa żywności z umiejętnościami cyfrowymi oraz świadomością środowiskową. Szczególnie istotne stają się kompetencje związane z analizą danych, wykorzystaniem technologii cyfrowych, zarządzaniem zasobami, gospodarką o obiegu zamkniętym oraz wdrażaniem zasad zrównoważonego rozwoju. Jednocześnie równie ważne pozostają kompetencje miękkie, takie jak współpraca interdyscyplinarna, komunikacja, przedsiębiorczość oraz zdolność adaptacji do dynamicznie zmieniających się warunków gospodarczych i technologicznych. Rozwijanie tego typu kompetencji może przyczynić się do ograniczenia luki kompetencyjnej obserwowanej obecnie pomiędzy wymaganiami rynku pracy a ofertą edukacyjną.

Doświadczenia zdobyte podczas realizacji projektu wskazują również na duży potencjał dalszego rozwoju międzynarodowych programów kształcenia. Programy takie sprzyjają umiędzynarodowieniu uczelni, wymianie doświadczeń, transferowi wiedzy oraz budowaniu trwałych relacji naukowych i zawodowych pomiędzy uczestnikami z różnych krajów. W przyszłości mogą one stanowić ważny element elastycznego systemu edukacji, odpowiadającego na potrzeby uczenia się przez całe życie oraz szybkie zmiany technologiczne i społeczne. Rozwój mikropoświadczeń, krótkich form kształcenia specjalistycznego oraz międzynarodowych kursów tematycznych może zwiększyć atrakcyjność oferty edukacyjnej uczelni, wspierać mobilność akademicką i zawodową oraz przyczynić się do kształcenia wysoko wykwalifikowanych kadr zdolnych do realizacji celów zielonej i cyfrowej transformacji w skali europejskiej i globalnej.

Na podstawie wyników z pierwszej edycji kursu można sformułować kilka kluczowych wniosków i rekomendacji dotyczących dalszego rozwoju programu. Pilotażowa edycja kursu potwierdziła wysoką skuteczność intensywnych międzynarodowych programów kształcenia w rozwijaniu kompetencji związanych z zieloną i cyfrową transformacją. W kolejnych edycjach warto jednak zwiększyć udział zagadnień dotyczących strategicznego zarządzania procesami transformacji, podejmowania decyzji w warunkach niepewności oraz praktycznego wykorzystania analizy danych i sztucznej inteligencji w sektorze rolno-spożywczym. Zasadne wydaje się również ograniczenie liczby uczestników grup podczas zajęć laboratoryjnych, co pozwoli na jeszcze efektywniejszą realizację ćwiczeń praktycznych i indywidualizację procesu kształcenia. Warto także rozważyć większe zaangażowanie przedstawicieli przedsiębiorstw i instytucji otoczenia gospodarczego, aby jeszcze lepiej powiązać treści kursu z aktualnymi potrzebami rynku pracy.

Bibliografia

- Altybayeva A., Rakhimzhanovb A., Zhanbyrbayevc A., Issayevad Z., Bekmukhamedove B. The state and prospects of digital transformation in the agricultural sectors. *Agricultural Engineering* Vol. 29, No.1, pp. 287-309 DOI: 10.2478/agriceng-2025-0017, 2025
- Barbero J., Collado L.A., Rodríguez-Crespo E., Santos A.M. The Twin Transition in the European Union: assessing regional patterns of EU-funded investments, *European Planning Studies*, 33:10, 1801-1821, <https://doi.org/10.1080/09654313.2025.2528882>, 2025
- Bertoglio R., Corbo C., Renga F.M., Matteucci M. The Digital Agricultural Revolution: A Bibliometric Analysis Literature Review. DOI: 10.1109/ACCESS.2021.3115258, 2021
- Czyżewska-Misztal D., Cabańska J. Podwójna transformacja w UE – stan obecny i wyzwania dla cyfrowej i zielonej Europy. *Zeszyty Naukowe Polskiego Towarzystwa Ekonomicznego w Zielonej Górze*, 19, s. 108-123. DOI: 10.26366/PTE.ZG.2023.249, 2023
- Digital skills ambitions in action. Cedefop's skills forecast digitalisation scenario. Pozyskano z: <https://www.cedefop.europa.eu/pl/publications/4218>
- European Commission – Digitalisation of Agriculture and Rural Areas. Pozyskano z: https://agriculture.ec.europa.eu/overview-vision-agriculture-food/digitalisation_en
- Instrukcja weryfikacji efektów kształcenia na Wydziale Inżynierii Produkcji Uniwersytetu Przyrodniczego w Lublinie. Pozyskano z: https://www.up.lublin.pl/files/wip/jakosc-ksztalcenia/instrukcje/wipjk_1_instrukcja_weryfikacji_efektow_ksztalcenia.pdf
- Kształtowanie transformacji cyfrowej: strategia UE. Pozyskano z: <https://www.europarl.europa.eu/topics/pl/article/20210414STO02010/ksztaltowanie-transformacji-cyfrowej-strategia-ue>
- Mitra N.K., Nagaraja H.S., Ponnudurai G., Judson J.P. The Levels Of Difficulty And Discrimination Indices In Type A Multiple Choice Questions Of Pre-clinical Semester. *Multidisciplinary Summative Tests. IeJSME* 3 (1): 2-7. DOI:10.56026/imu.3.1.2, 2009
- Kisielewski P., Stanek A. Klasyfikacja zagrożeń w łańcuchu dostaw i wybrane metody analizy i oceny ryzyka. *Autobusy*, 6, 1415-1424, 2017
- Podwójna transformacja – modne hasło czy realne wyzwanie? Pozyskano z: <https://wsiz.edu.pl/blog-naukowy/podwojna-transformacja-modne-haslo-czy-realne-wyzwanie/>
- Ramalho R.A., Goodburn B., Mayor L., Lindner L.F., Knöbl C.F., Trienekens J., Rossi D., Sanna F., Berruto R., Busato P. Skill Needs for Sustainable Agri-Food and Forestry Sectors (II): Insights of a European Survey. *Sustainability* 15, 4115. <https://doi.org/10.3390/su15054115>, 2023
- Strategic Dialogue on the Future of EU Agriculture. European Commission 2024. Pozyskano z: https://commission.europa.eu/topics/agriculture-and-rural-development/strategic-dialogue-future-eu-agriculture_en
- Ścieżka przejściowa dla ekosystemu przemysłu rolno-spożywczego. Pozyskano z: https://single-market-economy.ec.europa.eu/sectors/agri-food-industrial-ecosystem/transition-pathway-agri-food-industrial-ecosystem_en
- Tabares S., Parida V., Chirumalla K. Twin Transition in industrial organizations: Conceptualization, implementation framework, and research agenda. *Technological Forecasting and Social Change*, Volume 213, 123995, <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2025.123995>, 2025
- Umiejętności i zmieniające się społeczeństwa. Pozyskano z: <https://www.cedefop.europa.eu/pl/themes/skills-changing-societies>
- Youssef B.A. Twin Transition: Digital Transformation Pathways for Sustainable Innovation. *Sustainability* 17, 9491. <https://doi.org/10.3390/su17219491>, 2025
- Załącznik do uchwały nr 62/2018-2019 Senatu UP w Lublinie z dnia 26 kwietnia 2019 r. Pozyskano z: https://www.up.lublin.pl/files/ksztalcenie/2016/regulamin_kurs_2019.pdf
- Zaspokajanie potrzeb w zakresie umiejętności niezbędnych do zielonej transformacji. Pozyskano z: <https://www.cedefop.europa.eu/en/publications/4220>



Adres do korespondencji: artur.kraszkiewicz@up.edu.pl

ORCID: Artur Kraszkiewicz 0000-0002-8031-0046

ORCID: Sławomir Kocira 0000-0002-2888-3023

ORCID: Jacek Ogrodniczek 0000-0002-6484-2245

ORCID: Beata Biernacka 0000-0001-5532-0683

ORCID: Małgorzata Góral-Kowalczyk 0000-0003-0665-5828

ORCID: Marta Czyżykiewicz b.d.

„Projekt pt. „Specialist in Agricultural and Food Engineering in the context of Green and Digital Transformation (Twin Transition)” jest finansowany ze środków Funduszu Europejskiego dla Rozwoju Społecznego 2021-2027 (FERS) w ramach projektu NAWA pn. „Wsparcie tworzenia i realizacji międzynarodowych programów kształcenia”, nr projektu FERS.01.05-IP.08-0436/23”.



Dofinansowane przez
Unię Europejską



ANALIZA WŁAŚCIWOŚCI FIZYCZNYCH ODWADNIANYCH OSMOTYCZNIE I SUSZONYCH JABŁEK

Krzysztof Lech¹, Klaudia Masztalerz¹, Mariusz Surma¹, Klaudiusz Jalożyński¹,
Mariusz Nejman¹

¹ Instytut Inżynierii Rolniczej, Wydział Przyrodniczo-Technologiczny, Uniwersytet
Przyrodniczy we Wrocławiu, ul. Chelmońskiego 37a, 51-630 Wrocław

Wprowadzenie

Warzywa i owoce o niewielkim stopniu przetworzenia łączą cechy żywności świeżej i wygodnej w użyciu. Ich popularność rośnie wraz ze świadomością konsumentów i preferencją dla produktów jak najmniej przetworzonych¹. Konsumenti oczekują wysokiej wartości odżywczej, świeżości oraz bezpieczeństwa mikrobiologicznego, co osiąga się dzięki łagodnym metodom utrwalania. W odpowiedzi rozwijane są technologiczne wydłużające trwałość przy minimalnych zmianach jakości². Odwadnianie osmotyczne polega na częściowym usunięciu wody przez zanurzenie surowca w roztworze hipertonicznym. Ogranicza degradację składników i pozwala zachować cechy sensoryczne³, a także powoduje mniejsze uszkodzenia struktury niż tradycyjne suszenie oraz może wzbogacać produkt. Nie zapewnia jednak pełnej trwałości mikrobiologicznej, dlatego jest zwykle etapem wstępnym przed dalszym suszeniem^{4,5}. Dodatkowo obniżenie zawartości wody skraca czas i zmniejsza energochłonność kolejnych procesów⁶. Sole nieorganiczne, zwłaszcza chlorek sodu i chlorek wapnia, są skutecznymi substancjami osmotycznymi dzięki małej masie cząsteczkowej i wysokiej aktywności, co zapewnia szybsze odwadnianie niż sacharoza^{7,8}. Chlorek wapnia dodatkowo wzmacnia

¹ Kowalska, H., Czajkowska, K., Cichowska, J., & Skarżyńska, K. Zastosowanie odwadniania osmotycznego w produkcji żywności mało przetworzonej. *Postępy Techniki Przetwórstwa Spożywczego*. 2016.

² Żukiewicz-Koc, W., & Kalbarczyk, J. Influence of Storage on The Quality of Natural Antioxidants in Fruit Beverages. *Polish Journal of Food and Nutrition Sciences*, 57(2A), 223–225. 2007.

³ Islam, M. Z., Das, S., Monalisa, K., & Sayem, A. S. M. (2019). Influence of Osmotic Dehydration on Mass Transfer Kinetics and Quality Retention of Ripe Papaya (*Carica papaya* L) during Drying. *AgriEngineering*, 1(2), 220–234. <https://doi.org/10.3390/agriengineering1020016>

⁴ Pieters, B., Assis, F. R., Morais, R. M. S. C., & Morais, A. M. M. B. Quality of 'Royal Gala' cut apple during osmotic dehydration. *Brazilian Journal of Food Technology*, 23, e2019059. <https://doi.org/10.1590/1981-6723.05919.2020>.

⁵ Lewicki, P. P., & Lenart, A. Osmotic Dehydration of Fruits and Vegetables. W *Handbook of Industrial Drying*. CRC Press. 1995.

⁶ Sahoo, P. K., & Sharma, A. Modelling of water loss and solute uptake during osmotic drying of carrots using weibull distribution approach. *International Food Research Journal*, 25. 2018.

⁷ Raoult-Wack, A. L. Recent advances in the osmotic dehydration of foods. *Trends in Food Science & Technology*, 5(8), 255–260. 1994. [https://doi.org/10.1016/0924-2244\(94\)90018-3](https://doi.org/10.1016/0924-2244(94)90018-3)

strukturę komórkową, poprawiając teksturę produktu⁹. Wśród węglowodanów najczęściej stosuje się sacharozę, cenioną za neutralny smak i przydatność w odwadnianiu owoców¹⁰.

Zagęszczone soki owocowe i warzywne stanowią alternatywne roztwory osmotyczne, które umożliwiają nie tylko skuteczne odwadnianie surowca, ale także jego jednocześnie wzbogacenie w naturalne cukry, kwasy organiczne, barwniki oraz związki bioaktywne¹¹. Dzięki temu produkt zyskuje bardziej złożony i pożądany profil smakowo-aromatyczny, zbliżony do surowca wyjściowego. Rozwiązanie to pozwala ograniczyć stosowanie syntetycznych dodatków, przy jednoczesnym zachowaniu wysokiej jakości sensorycznej i wartości odżywczej produktu końcowego¹².

Owadnianie osmotyczne, jako metoda o ograniczonej skuteczności, często łączone jest z innymi technikami suszenia. Suszenie konwekcyjne jest powszechne, lecz długotrwałe i może pogarszać jakość produktu, natomiast liofilizacja zapewnia wysoką jakość, ale jest kosztowna i energochłonna. Suszenie mikrofalowe przyspiesza proces i sprzyja tworzeniu porowatej struktury, jednak wymaga precyzyjnej kontroli. Coraz częściej stosuje się metody hybrydowe, np. mikrofalowo-próżniowe, które poprawiają jakość i ograniczają zużycie energii¹³. Odwadnianie osmotyczne, stosowane jako etap wstępny suszenia, poprawia właściwości fizyczne i sensoryczne produktów końcowych. W surowcach o wysokiej zawartości wody umożliwia częściowe odwodnienie oraz modyfikację struktury, co zmniejsza skurcz suszarniczy i poprawia teksturę, zwiększając kruchość i porowatość¹⁴.

⁸ Rastogi, N. K., Raghavarao, K. S. M. S., Niranjana, K., & Knorr, D. Recent developments in osmotic dehydration: Methods to enhance mass transfer. *Trends in Food Science & Technology*, 13(2), 48–59. 2002. [https://doi.org/10.1016/S0924-2244\(02\)00032-8](https://doi.org/10.1016/S0924-2244(02)00032-8)

⁹ Martín-Diana, A. B., Rico, D., Frías, J. M., Barat, J. M., Henchan, G. T. M., & Barry-Ryan, C. Calcium for extending the shelf life of fresh whole and minimally processed fruits and vegetables: A review. *Trends in Food Science & Technology*, 18(4), 210–218. 2007. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2006.11.027>

¹⁰ Kowalska, H., Lenart, A., Leszczyk, D. The effect of blanching and freezing on osmotic dehydration of pumpkin. *Journal of Food Engineering*, 86(1), 30–38. 2008. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2007.09.006>

¹¹ Moreno, J., Simpson, R., Pizarro, N., Parada, K., Pinilla, N., Reyes, J. E., & Almonacid, S. Effect of ohmic heating and vacuum impregnation on the quality and microbial stability of osmotically dehydrated strawberries (cv. Camarosa). *Journal of Food Engineering*, International Conference on Food Innovation - foodInnova 2010, 110(2), 310–316. 2012. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2011.03.005>

¹² Nowacka, M., Tylewicz, U., Laghi, L., Dalla Rosa, M., & Witrowa-Rajchert, D. Effect of ultrasound treatment on the water state in kiwifruit during osmotic dehydration. *Food Chemistry*, Special Issue: 7th International Conference on Water in Food, 144, 18–25. 2014. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2013.05.129>

¹³ Zimmer, A., Masztalerz, K., Lech, K. Effect of Osmotic Dehydration in Tomato Juice on Microstructure of Garlic and on Drying Using Different Methods. *Agriculture*, 14(7). 2024. <https://doi.org/10.3390/agriculture1407116>

¹⁴ Figiel, A., Michalska, A. Overall Quality of Fruits and Vegetables Products Affected by the Drying Processes with the Assistance of Vacuum-Microwaves. *International Journal of Molecular Sciences*, 18(1). 2016. <https://doi.org/10.3390/ijms18010071>

Celem badań było określenie wpływu odwadniania osmotycznego w zagęszczonych sokach owocowych oraz suszenia łączonego na strukturę wewnętrzną i właściwości fizyczne otrzymanych chipsów jabłkowych.

Odwadnianie osmotyczne i suszenie jabłek

Jabłka odmiany *Szampion* pocięto na 16 równych półksiężyców. Do procesu odwadniania osmotycznego wykorzystano zagęszczony sok jabłkowy i aroniowy o stężeniu 40°Bx w różnych mieszankach. Wykorzystano trzy roztwory osmotyczne: zagęszczony sok jabłkowy (J100%) oraz jego mieszaniny z zagęszczonym sokiem aroniowym zawierające odpowiednio 33% (A33%) i 66% (A66%) soku aroniowego; pozostałą część stanowił zagęszczony sok jabłkowy. Odwadnianie przeprowadzono w temperaturze 45°C, przez 90 min. Próbkę kontrolną stanowiły jabłka suszone bez odwadniania osmotycznego. Jabłka suszono konwekcyjnie (70°C, 2 h) oraz mikrofalowo-próżniowo (60–500 W·kg⁻¹, ok. 8 kPa) do zawartości wody 3%.

W tabeli 1 przedstawiono ubytek wody oraz przyrost substancji podczas odwadniania jabłek. Średni ubytek wody wynosił 0,128 g·g⁻¹ surowca we wszystkich próbach. Znacznie większe wartości ubytku wody uzyskano w innych badaniach, w których ubytek wynosił ponad 0,3 g·g⁻¹ surowca jest to związane z tym, że jabłka były pokrojone na znacznie mniejsze cząstki, co istotnie wpływało na powierzchnię wymiany masy podczas odwadniania. Przyrost suchej substancji stanowił średnio 0,0496 g·g⁻¹ i był blisko dwukrotnie mniejszy niż w badaniach, w których cząstki jabłek miały znacznie mniejszy kształt (cylindry o średnicy 18 mm i wysokości 3,35 mm)¹⁵, powierzchnia wymiany istotnie wpłynęła na zwiększenie wartości przyrostu suchej substancji, co zostało potwierdzone w innych badaniach^{16,17}. Wyniki czasu suszenia oraz wilgotność i aktywność wody analizowanych próbek przedstawiono w tabeli 1. Próbki odwadniane osmotycznie suszyły się krócej, ponieważ podczas odwadniania osmotycznego wstępnie zostały odwodnione i ilość wody potrzebna do odparowania była mniejsza niż dla kontroli. Nie stwierdzono istotnych statystycznie różnic dla próbek odwadnianych w różnych roztworach. Zauważono, że wraz ze wzrostem WL skraca się czas suszenia¹⁸. Jabłka świeże miały 81,29% wody oraz bardzo wysoką aktywność wody. Susze charakteryzowały się bardzo niską wilgotnością i aktywnością wody, co jest typowe dla su-

¹⁵ Masztalerz, K., Lech, K., Wojdyło, A., Nowicka, P., Michalska-Ciechanowska, A., Figiel, A. The impact of the osmotic dehydration process and its parameters on the mass transfer and quality of dried apples. *Drying Technology*, 39(8), 1074–1086. 2021. <https://doi.org/10.1080/07373937.2020.1741607>.

¹⁶ Lech, K., Figiel, A., Wojdyło, A., Korzeniowska, M., Serowik, M., Szarycz, M. Drying Kinetics and Bioactivity of Beetroot Slices Pretreated in Concentrated Chokeberry Juice and Dried with Vacuum Microwaves. *Drying Technology*, 33(13), 1644–1653. 2015. <https://doi.org/10.1080/07373937.2015.1075209>.

¹⁷ Patel, D. N., Sutar, P. P., Sutar, N. Development of Instant Fermented Cereal-Legume Mix Using Pulsed Microwave Vacuum Drying. *Drying Technology*, 31(3), 314–328. 2013. <https://doi.org/10.1080/07373937.2012.736002>.

¹⁸ Chua, L. S., Abd Wahab, N. S., Soo, J., Lv, Z. Effects of Osmotic Dehydration on Drying Kinetics and Bioactive Properties of Jaboticaba Berries. *ACS Food Science & Technology*, 4(9), 2217–2225. 2024. <https://doi.org/10.1021/acsfoodscitech.4c00473>

suszonych chipsów owocowych, ponadto niewielkie różnice zależały głównie od czasu suszenia¹⁹.

Tabela 1. Ubytek wody i przyrost substancji podczas odwadniania osmotycznego, czas suszenia oraz wilgotność i aktywność wody świeżych i suszonych jabłek.

Próbka	Ubytek wody (g·g ⁻¹ surowca)	Przyrost substancji (g·g ⁻¹ surowca)	Czas suszenia (min)	Wilgotność (%)	Aktywność wody (-)
Świeże jabłko	-	-	-	81,29±1,33	0,983±0,004
Kontrola	0	0	266±5,66 b*	2,19±0,09 a	0,201±0,013 ab
J 100%	0,1252±0,0078 a	0,0488±0,0031 a	215±7,07 a	1,23±0,08 a	0,213±0,016 b
A 33%	0,1263±0,0079 a	0,0484±0,0030 a	208±2,83 a	1,79±0,06 a	0,147±0,013 a
A 66%	0,1313±0,0082 b	0,0517±0,0032 b	204±5,66 a	1,47±0,08 a	0,179±0,014 ab

* średnia ± odchylenie standardowe, takie same litery w kolumnach, nie różnią się statystycznie (p ≤ 0,05; test Tukey HSD)

Analiza właściwości fizycznych chipsów jabłkowych

Dla uzyskanych chipsów określono parametry barwy oraz trzy gęstości (właściwą, pozorną i piknometryczną), na podstawie których obliczono porowatość całkowitą, otwartą i zamkniętą. Tabela 2 przedstawia parametry barwy dla jabłek świeżych oraz odwadnianych osmotycznie i suszonych. W przypadku próby kontrolnej zaobserwowano wzrost wartości L* (85,9), co wskazuje na rozjaśnienie materiału, prawdopodobnie związane ze zmianami strukturalnymi i większym rozpraszaniem światła po usunięciu wody. Jednocześnie parametry a* i b* nie uległy istotnym zmianom, co potwierdza brak znaczącego wpływu samego suszenia na odcień barwy²⁰. Zastosowanie odwadniania osmotycznego w soku jabłkowym spowodowało niewielkie obniżenie jasności (L* = 77,6) oraz przesunięcie wartości a* w kierunku dodatnim (1,3), co świadczy o lekkim wzroście udziału barwy czerwonej. Jednak zmiany te nie były istotne w porównaniu z próbą kontrolną, a różnica barwy ($\Delta E^* = 8,0$) wskazuje jedynie na umiarkowaną zmianę percepcyjną²¹. Znacznie większe zmiany zaobserwowano w próbkach odwad-

¹⁹ Xiao, M., Bi, J., Yi, J., Zhao, Y., Peng, J., Zhou, L., Chen, Q. Osmotic pretreatment for instant controlled pressure drop dried apple chips: Impact of the type of saccharides and treatment conditions. *Drying Technology*, 37(7), 896–905. 2019.

²⁰ Maskan, M. Drying, Shrinkage and Rehydration Characteristics of Kiwifruits During Hot Air and Microwave Drying. *Journal of Food Engineering - J FOOD ENG*, 48. 2001. [https://doi.org/10.1016/S0260-8774\(00\)00155-2](https://doi.org/10.1016/S0260-8774(00)00155-2)

²¹ Pathare, P., Opara, U., Al Said, F. Colour Measurement and Analysis in Fresh and Processed Foods: A Review. *Food and Bioprocess Technology*. 2013. <https://doi.org/10.1007/s11947-012-0867-9>

nianych w soku aroniowym. Zarówno dla A 33%, jak i A 66% nastąpił gwałtowny spadek jasności (odpowiednio $L^* = 34,6$ i $27,1$), co świadczy o silnym przyciemnieniu materiału. Równocześnie odnotowano istotny wzrost wartości a^* ($29,9$ dla A 33% i $16,2$ dla A 66%), wskazujący na intensyfikację barwy czerwonej, oraz spadek parametru b^* , aż do wartości ujemnych w przypadku A 66% ($-2,4$), co oznacza przesunięcie barwy w kierunku tonów niebiesko-fioletowych. Zmiany te są związane z obecnością antocyjanów pochodzących z soku aroniowego, które dominują w kształtowaniu barwy produktu²². Wysokie wartości różnicy barwy ($\Delta E^* \approx 60$) dla obu prób z dodatkiem soku aroniowego wskazują na całkowitą zmianę wyglądu w porównaniu do świeżego surowca. Ponadto brak istotnych różnic między A 33% i A 66% w zakresie ΔE^* sugeruje, że już niższe stężenie soku aroniowego jest wystarczające do uzyskania silnego efektu barwiącego.

Tabela 2. Parametry barwy oraz różnica barw jabłek świeżych i wysuszonych.

Próbka	L^*	a^*	b^*	dE^*
Świeże jabłko	$81,4 \pm 0,1$	$-4,3 \pm 0,1$	$19,7 \pm 0,2$	-
Kontrola	$85,9 \pm 3,1$ d*	$-3,9 \pm 0,5$ a	$23,9 \pm 0,8$ a	$6,7 \pm 2,1$ a
J 100%	$77,6 \pm 2,1$ c	$1,3 \pm 0,6$ a	$23,4 \pm 1,7$ a	$8 \pm 1,3$ a
A 33%	$34,6 \pm 1,8$ b	$29,9 \pm 3$ c	$4,4 \pm 1,4$ c	$60 \pm 0,9$ b
A 66%	$27,1 \pm 2,7$ a	$16,2 \pm 4,9$ b	$-2,4 \pm 1,5$ b	$62,1 \pm 1,4$ b

* średnia $\pm$ odchylenie standardowe, takie same litery w kolumnach, nie różnią się statystycznie ($p \leq 0,05$; test Tukey HSD)

W tabeli 3 przedstawiono wyniki gęstości oraz porowatości jabłek odwadnianych osmotycznie i suszonych. Zastosowanie odwadniania osmotycznego przed suszeniem istotnie wpłynęło na właściwości strukturalne chipsów jabłkowych, w szczególności ich gęstość oraz porowatość²³. Próbka kontrolna (jabłka wyłącznie suszone) charakteryzowała się najniższą gęstością pozorną ($0,258 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$) oraz najwyższą porowatością całkowitą ($82,34\%$), co wskazuje na silnie rozwiniętą, napowietrzoną strukturę materiału. Jednocześnie wysoka porowatość otwarta ($66,16\%$) sugeruje obecność licznych, dostępnych kapilar i przestrzeni międzykomórkowych powstałych podczas suszenia²⁴. Zastosowanie odwadniania osmotycznego w soku jabłkowym (J 100%) spowodowało istotny wzrost gęstości pozornej (do $0,352 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$) oraz spadek porowatości całkowitej (do $77,04\%$), choć różnice w porowatości całkowitej nie były statystycznie istotne. Ponadto zaobserwowano istotne zmniejszenie porowatości otwartej ($52,55\%$) oraz wzrost porowatości zamkniętej ($24,49\%$). Może to wynikać z wnikania substancji roz-

²² Oszmiański, J., Wojdyło, A. Aronia melanocarpa phenolics and their antioxidant activity. European Food Research and Technology, 221, 809–813. 2005. <https://doi.org/10.1007/s00217-005-0002-5>

²³ Rastogi, N. K., Raghavarao, K. S. M. S. Mass Transfer During Osmotic Dehydration: Determination of Moisture and Solute Diffusion Coefficients from Concentration Profiles. Food and Bioproducts Processing, Mixing, Heat and Mass Transfer, 82(1), 44–48. 2004. <https://doi.org/10.1205/096030804322985308>

²⁴ Mayor, L., Sereno, A. M. Modelling shrinkage during convective drying of food materials: A review. Journal of Food Engineering, 61(3), 373–386. 2004. [https://doi.org/10.1016/S0260-8774\(03\)00144-4](https://doi.org/10.1016/S0260-8774(03)00144-4)

puszczonych z roztworu osmotycznego do tkanki jabłek, co prowadzi do częściowego wypełnienia wolnych przestrzeni i ograniczenia tworzenia otwartych porów podczas suszenia. W przypadku próbek odwadnianych w soku aroniowym (A 33% i A 66%) zaobserwowano wartości pośrednie pomiędzy próbą kontrolną a J 100%. Gęstość pozorna była wyższa niż w kontroli, lecz niższa niż w J 100%, co wskazuje na umiarkowany efekt zagęszczania struktury. Porowatość całkowita utrzymywała się na zbliżonym poziomie (brak różnic istotnych statystycznie), jednak widoczna była tendencja do zmniejszania porowatości otwartej wraz ze wzrostem stężenia soku aroniowego oraz jednoczesnego wzrostu udziału porów zamkniętych. Szczególnie w próbce A 66% można zauważyć częściowy powrót do wartości zbliżonych do kontroli w zakresie porowatości otwartej (62,60%), co może sugerować, że wyższe stężenie roztworu aroniowego ogranicza intensywność wnikania substancji do wnętrza tkanki lub wpływa odmiennie na jej strukturę w porównaniu z sokiem jabłkowym²⁵. Podsumowując, odwadnianie osmotyczne prowadzi do zagęszczenia struktury chipsów jabłkowych, zmniejszenia udziału porów otwartych oraz zwiększenia porowatości zamkniętej. Efekt ten jest najbardziej wyraźny w przypadku zastosowania soku jabłkowego, natomiast sok aroniowy wykazuje działanie pośrednie, zależne od jego stężenia.

Tabela 3. Gęstość właściwa, pozorna i piknometryczna oraz porowatość całkowita, otwarta i zamknięta chipsów z jabłek.

Próbka	Gęstość ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)			Porowatość (%)		
	właściwa	pozorna	piknometryczna	całkowita	otwarta	zamknięta
Kontrola	1,463±0,01 1 a*	0,258±0,00 8 b	0,764±0,013 a	82,34±0,6 4 a	66,16±1,5 4 b	16,18±0,9 a
J 100%	1,533±0,01 8 b	0,352±0,02 8 a	0,743±0,018 b	77,04±1,5 5 a	52,55±4,8 9 a	24,49±3,3 4 b
A 33%	1,5±0,018 ab	0,323±0,02 9 a	0,739±0,008 ab	78,49±2,1 6 a	56,34±3,4 1 ab	22,14±1,2 5 ab
A 66%	1,47±0,004 a	0,291±0,01 8 a	0,752±0,008 ab	80,86±0,5 a	62,6±0,67 ab	18,26±0,1 7 ab

* średnia ± odchylenie standardowe, takie same litery w kolumnach, nie różnią się statystycznie ($p \leq 0,05$; test Tukey HSD)

Analiza struktury wewnętrznej chipsów jabłkowych

Dla uzyskanych chipsów przeprowadzono analizę struktury wewnętrznej przy użyciu mikrotomografu komputerowego oraz skaningowego mikroskopu elektronowego. Rysunek 1 przedstawia obraz 3D uzyskany przy pomocy mikrotomografu komputerowego wraz z przekrojami pokazującymi mikrostrukturę próbki poddanej odwadnianiu osmotycznemu i suszeniu. Analiza obrazu wykazała istotne zmiany w mikrostrukturze materiału, zaobserwowano wyraźnie heterogeniczną strukturę wewnętrzną charaktery-

²⁵ Chiralt, A., & Talens, P. Physical and chemical changes induced by osmotic dehydration in plant tissues. Journal of Food Engineering, IV Iberoamerican Congress of Food Engineering (CIBIA IV), 67(1), 167–177. 2005. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2004.05.055>

zującą się obecnością licznych, nieregularnych porów powstających w wyniku usunięcia wody z materiału. Na rysunku widoczne są także obszary większej gęstości na krawędzi próbki wskazujące na penetrację składników z roztworu osmotycznego do materiału, co potwierdza przyrost substancji (tab. 1). Dodatkowo można zaobserwować częściowe zapadnięcie struktury komórkowej i skurcz próbki, co jest charakterystyczne dla materiałów poddanych procesowi suszenia konwekcyjnego oraz lokalną obecność dużych porów, co prawdopodobnie jest wynikiem „puffingu” powstającego w trakcie suszenia mikrofalowo-próżniowego²⁶. Podobne wyniki zaobserwowano w badaniach nad odwadnianym osmotycznie i suszonym czosnkiem²⁷.



Rysunek 1. Przykładowy obraz z mikrotomografu komputerowego wysuszonych jabłek wstępnie odwadnianych w zagęszczonym soku aroniowym (A 33%)

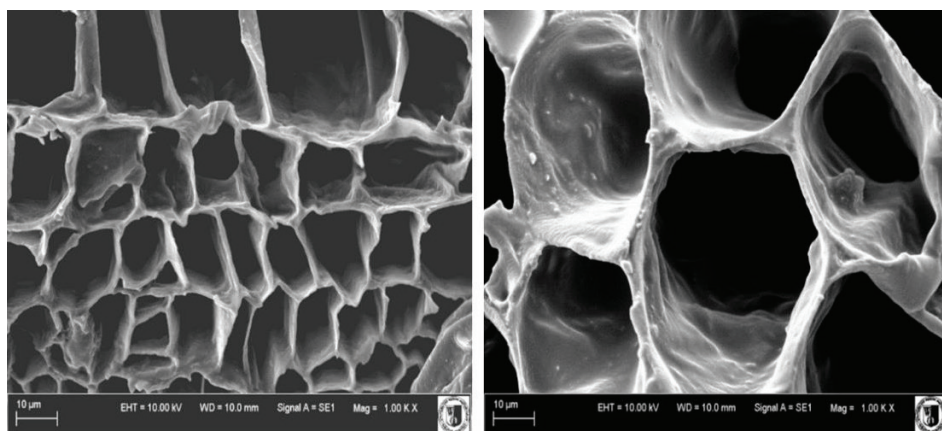
Na rysunku 2 przedstawiono obraz z mikroskopu skaningowego (SEM) wysuszonych jabłek bez odwadniania (kontrola) oraz po zastosowaniu odwadniania osmotycznego w zagęszczonym soku aroniowym (A33%). W przypadku próbki kontrolnej (strona lewa) obserwuje się stosunkowo jednorodną i porowatą mikrostrukturę charakterystyczną dla suszonego materiału. Widoczna jest wyraźna sieć otwartych po-

²⁶ Calín-Sánchez, Á., Lipan, L., Cano-Lamadrid, M., Kharaghani, A., Masztalerz, K., Carbonell-Barrachina, Á. Figiel, A. Comparison of Traditional and Novel Drying Techniques and Its Effect on Quality of Fruits, Vegetables and Aromatic Herbs. *Foods*, 9(9). 2020. <https://doi.org/10.3390/foods9091261>

²⁷ Zimmer, A., Masztalerz, K., Lech, K. Effect of Osmotic Dehydration in Tomato Juice on Microstructure of Garlic and on Drying Using Different Methods. *Agriculture*, 14(7). 2024. <https://doi.org/10.3390/agriculture1407116>.

rów powstałych w wyniku usunięcia wody i zapadania się struktur komórkowych podczas procesu suszenia. Tego typu morfologia jest typowa dla produktów suszonych bez wcześniejszego odwadniania osmotycznego i wiąże się z większą dostępnością przestrzeni kapilarnych.

W przypadku próbki poddanej odwadnianiu osmotycznemu (strona prawa) zaobserwowano istotne zmiany mikrostrukturalne. Widoczne jest częściowe wypełnienie porów, co wskazuje na niewielką penetrację zagęszczonego soku aroniowego, co sugeruje relatywnie niską intensywność wymiany masy w trakcie procesu oraz zgodność z obserwowanym niewielkim przyrostem substancji (tab. 1). Jednocześnie zachowana zostaje ogólna struktura tkanki, co może świadczyć o łagodnym charakterze zastosowanych warunków odwadniania oraz krótkim czasem trwania obróbki wstępnej. Podobne zmiany mikrostrukturalne, obejmujące częściowe wypełnienie porów oraz modyfikację struktury komórkowej, obserwowano również w badaniach nad odwadnianiem osmotycznym jabłek i buraków^{28,29}.



Rysunek 2. Przykładowy obraz z mikroskopu skaningowego wysuszonych jabłek bez odwadniania (lewy) i wstępnie odwadnianych w zagęszczonym soku aroniowym (A 33%) (prawy)

²⁸ Masztalerz, K., Figiel, A., Michalska-Ciechanowska, A., Wojdyło, A., Nowicka, P., & Lech, K. The Effect of Filtration on Physical and Chemical Properties of Osmo-Dehydrated Material. *Molecules*, 25(22). 2020. <https://doi.org/10.3390/molecules25225412>

²⁹ Lech, K., Figiel, A., Wojdyło, A., Korzeniowska, M., Serowik, M., & Szarycz, M. Drying Kinetics and Bioactivity of Beetroot Slices Pretreated in Concentrated Chokeberry Juice and Dried with Vacuum Microwaves. *Drying Technology*, 33(13), 1644–1653. 2015. <https://doi.org/10.1080/07373937.2015.1075209>.

Podsumowanie

Przeprowadzone badania dotyczyły oceny wpływu odwadniania osmotycznego w zagęszczonych sokach owocowych na właściwości fizyczne oraz jakość suszonych jabłek. Analizowano czas suszenia oraz zmiany wybranych parametrów strukturalnych, gęstości i barwy otrzymanych chipsów. Na podstawie przeprowadzonych badań można sformułować następujące wnioski:

1. Zastosowanie odwadniania osmotycznego istotnie skraca czas suszenia jabłek, nie pogarszając jednocześnie ich struktury wewnętrznej.
2. Odwadnianie osmotyczne w zagęszczonych sokach owocowych nie wpływa znacząco na gęstość właściwą i piknometryczną suszu, natomiast zwiększa gęstość pozorną oraz porowatość zamkniętą otrzymanych chipsów.
3. Największy wpływ odwadniania osmotycznego zaobserwowano w zmianach barwy produktu, szczególnie w przypadku zastosowania zagęszczonego soku aroniowego.

Bibliografia

- Calín-Sánchez, Á., Lipan, L., Cano-Lamadrid, M., Kharaghani, A., Masztalerz, K., Carbonell-Barrachina, Á., Figiel, A. Comparison of Traditional and Novel Drying Techniques and Its Effect on Quality of Fruits, Vegetables and Aromatic Herbs. *Foods*, 9(9) 2020. <https://doi.org/10.3390/foods9091261>
- Chiralt, A., & Talens, P. Physical and chemical changes induced by osmotic dehydration in plant tissues. *Journal of Food Engineering, IV Iberoamerican Congress of Food Engineering (CIBIA IV)*, 67(1), 167–177. 2005. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2004.05.055>
- Chua, L. S., Abd Wahab, N. S., Soo, J., Lv, Z. Effects of Osmotic Dehydration on Drying Kinetics and Bioactive Properties of Jaboticaba Berries. *ACS Food Science & Technology*, 4(9), 2024. 2217–2225. <https://doi.org/10.1021/acsfoodscitech.4c00473>
- Figiel, A., & Michalska, A. Overall Quality of Fruits and Vegetables Products Affected by the Drying Processes with the Assistance of Vacuum-Microwaves. *International Journal of Molecular Sciences*, 18(1). 2016. <https://doi.org/10.3390/ijms18010071>
- Islam, M. Z., Das, S., Monalisa, K., & Sayem, A. S. M. Influence of Osmotic Dehydration on Mass Transfer Kinetics and Quality Retention of Ripe Papaya (*Carica papaya* L) during Drying. *AgriEngineering*, 1(2), 220–234. 2019. <https://doi.org/10.3390/agriengineering1020016>
- Kowalska, H., Czajkowska, K., Cichowska, J., Skarżyńska, K. Zastosowanie odwadniania osmotycznego w produkcji żywności mało przetworzonej. *Postępy Techniki Przetwórstwa Spożywczego*, Nr 1. 2016. <http://yadda.icm.edu.pl/baztech/element/bwmeta1.element.baztech-d62e838b-2cb2-4e79-8e7a-1efd2e92a54d>
- Kowalska, H., Lenart, A., Leszczyk, D. The effect of blanching and freezing on osmotic dehydration of pumpkin. *Journal of Food Engineering*, 86(1), 30–38. 2008. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2007.09.006>
- Lech, K., Figiel, A., Wojdyło, A., Korzeniowska, M., Serowik, M., Szarycz, M. Drying Kinetics and Bioactivity of Beetroot Slices Pretreated in Concentrated Chokeberry Juice and Dried with Vacuum Microwaves. *Drying Technology*, 33(13), 1644–1653. 2015. <https://doi.org/10.1080/07373937.2015.1075209>
- Lewicki, P. P., & Lenart, A. Osmotic Dehydration of Fruits and Vegetables. W *Handbook of Industrial Drying*. CRC Press. 1995.

- Martín-Diana, A. B., Rico, D., Frías, J. M., Barat, J. M., Henehan, G. T. M., Barry-Ryan, C. Calcium for extending the shelf life of fresh whole and minimally processed fruits and vegetables: A review. *Trends in Food Science & Technology*, 18(4), 210–218. 2007. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2006.11.027>
- Maskan, M. Drying, Shrinkage and Rehydration Characteristics of Kiwifruits During Hot Air and Microwave Drying. *Journal of Food Engineering - J FOOD ENG*, 48. 2001. [https://doi.org/10.1016/S0260-8774\(00\)00155-2](https://doi.org/10.1016/S0260-8774(00)00155-2)
- Masztalerz, K., Figiel, A., Michalska-Ciechanowska, A., Wojdyło, A., Nowicka, P., Lech, K. The Effect of Filtration on Physical and Chemical Properties of Osmo-Dehydrated Material. *Molecules*, 25(22). 2020. <https://doi.org/10.3390/molecules25225412>
- Masztalerz, K., Lech, K., Wojdyło, A., Nowicka, P., Michalska-Ciechanowska, A., Figiel, A. The impact of the osmotic dehydration process and its parameters on the mass transfer and quality of dried apples. *Drying Technology*, 39(8), 1074–1086. 2021. <https://doi.org/10.1080/07373937.2020.1741607>
- Mayor, L., & Sereno, A. M. Modelling shrinkage during convective drying of food materials: A review. *Journal of Food Engineering*, 61(3), 373–386. 2004. [https://doi.org/10.1016/S0260-8774\(03\)00144-4](https://doi.org/10.1016/S0260-8774(03)00144-4)
- Moreno, J., Simpson, R., Pizarro, N., Parada, K., Pinilla, N., Reyes, J. E., Almonacid, S. Effect of ohmic heating and vacuum impregnation on the quality and microbial stability of osmotically dehydrated strawberries (cv. Camarosa). *Journal of Food Engineering, International Conference on Food Innovation - foodInnova 2010*, 110(2), 310–316. 2012. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2011.03.005>
- Nowacka, M., Tylewicz, U., Laghi, L., Dalla Rosa, M., Witrowa-Rajchert, D. Effect of ultrasound treatment on the water state in kiwifruit during osmotic dehydration. *Food Chemistry, Special Issue: 7th International Conference on Water in Food*, 144, 18–25. 2014. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2013.05.129>
- Oszmiański, J., & Wojdyło, A. Aronia melanocarpa phenolics and their antioxidant activity. *European Food Research and Technology*, 221, 809–813. 2005. <https://doi.org/10.1007/s00217-005-0002-5>
- Patel, D. N., Sutar, P. P., Sutar, N. Development of Instant Fermented Cereal-Legume Mix Using Pulsed Microwave Vacuum Drying. *Drying Technology*, 31(3), 314–328. 2013. <https://doi.org/10.1080/07373937.2012.736002>
- Pathare, P., Opara, U., Al Said, F. Colour Measurement and Analysis in Fresh and Processed Foods: A Review. *Food and Bioprocess Technology*. 2013. <https://doi.org/10.1007/s11947-012-0867-9>
- Pieters, B., Assis, F. R., Morais, R. M. S. C., & Morais, A. M. M. B. (2020). Quality of ‘Royal Gala’ cut apple during osmotic dehydration. *Brazilian Journal of Food Technology*, 23, e2019059. <https://doi.org/10.1590/1981-6723.05919>
- Raoult-Wack, A. L. Recent advances in the osmotic dehydration of foods. *Trends in Food Science & Technology*, 5(8), 255–260. 1994. [https://doi.org/10.1016/0924-2244\(94\)90018-3](https://doi.org/10.1016/0924-2244(94)90018-3)
- Rastogi, N. K., & Raghavarao, K. S. M. S. Mass Transfer During Osmotic Dehydration: Determination of Moisture and Solute Diffusion Coefficients from Concentration Profiles. *Food and Bioprocess Processing, Mixing, Heat and Mass Transfer*, 82(1), 44–48. 2004. <https://doi.org/10.1205/096030804322985308>
- Rastogi, N. K., Raghavarao, K. S. M. S., Niranjana, K., & Knorr, D. Recent developments in osmotic dehydration: Methods to enhance mass transfer. *Trends in Food Science & Technology*, 13(2), 48–59. 2002. [https://doi.org/10.1016/S0924-2244\(02\)00032-8](https://doi.org/10.1016/S0924-2244(02)00032-8)
- Sahoo, P. K., & Sharma, A. Modelling of water loss and solute uptake during osmotic drying of carrots using weibull distribution approach. *International Food Research Journal*, 25. 2018.

- Xiao, M., Bi, J., Yi, J., Zhao, Y., Peng, J., Zhou, L., Chen, Q. Osmotic pretreatment for instant controlled pressure drop dried apple chips: Impact of the type of saccharides and treatment conditions. *Drying Technology*, 37(7), 896–905. 2019. <https://doi.org/10.1080/07373937.2018.1473419>
- Zimmer, A., Masztalerz, K., Lech, K. Effect of Osmotic Dehydration in Tomato Juice on Microstructure of Garlic and on Drying Using Different Methods. *Agriculture*, 14(7). 2024. <https://doi.org/10.3390/agriculture14071164>
- Żukiewicz-Koc, W., & Kalbarczyk, J. INFLUENCE OF STORAGE ON THE QUALITY OF NATURAL ANTIOXIDANTS IN FRUIT BEVERAGES. *Polish Journal of Food and Nutrition Sciences*, 57(2A), 223–225. 2007.

Adres do korespondencji: krzysztof.lech@upwr.edu.pl

ORCID: Krzysztof Lech 0000-0002-6540-5274

ORCID: Klaudia Masztalerz 0000-0002-1186-2891

ORCID: Mariusz Surma 0000-0002-2685-7649

ORCID: Klaudiusz Jałoszyński 0000-0002-7923-6184

ORCID: Mariusz Nejman 0000-0001-8514-4713

Badania finansowane ze środków Unii Europejskiej w ramach działania „WSPÓŁPRACA” PROW 2014-2020, nr umowy: 00051.DDD.6509.00100.2019.01.

SYSTEM AUTOMATYCZNEGO STEROWANIA URZĄDZENIAMI GOSPODARSTW DOMOWYCH W ASPEKcie PROFILU POZYSKIwanej ENERGII z SIŁOWNI FOTOWOLTAICZNEJ

Stanisław Lis¹, Rafał Przepióra, Henryk Juszka¹

¹ Katedra Inżynierii Bioprocessów, Energetyki i Automatykacji, Wydział Inżynierii Produkcji i Energetyki, Uniwersytet Rolniczy w Krakowie

Wprowadzenie

W ostatnich latach obserwuje się dynamiczny wzrost wykorzystania odnawialnych źródeł energii, w szczególności instalacji fotowoltaicznych, zarówno w Polsce, jak i na świecie¹. Rozwój mikroinstalacji prosumenckich powoduje jednak nowe wyzwania związane z efektywnym zarządzaniem wyprodukowaną energią elektryczną. W praktyce znaczna część energii wytwarzanej w godzinach największego nasłonecznienia nie jest zużywana na bieżąco i trafia do sieci elektroenergetycznej, co obniża poziom auto-konsumpcji energii w gospodarstwach domowych. Zjawisko to jest charakterystyczne dla systemów fotowoltaicznych przyłączonych do sieci elektroenergetycznej, w których produkcja energii nie zawsze pokrywa się z profilem jej zużycia^{2,3}.

W odpowiedzi na powyższy problem rozwijane są systemy zarządzania energią (Home Energy Management Systems), których zadaniem jest optymalizacja zużycia energii w czasie rzeczywistym. W literaturze proponowane są różne podejścia, obejmujące m.in. metody oparte na algorytmach optymalizacyjnych, uczeniu maszynowym oraz systemach Internetu Rzeczy^{4,5}. Coraz większe znaczenie zyskują również metody sztucznej inteligencji, w tym logika rozmyta, umożliwiająca modelowanie niepewności oraz podejmowanie decyzji w warunkach zmiennego i trudnego do jednoznacznego opisanego środowiska pracy instalacji fotowoltaicznej^{6,7}.

Pomimo licznych badań w tym obszarze, nadal istnieje potrzeba opracowania rozwiązań uwzględniających rzeczywiste profile produkcji energii oraz ich sezonową zmienność, a także umożliwiających bezpośrednią implementację w systemach mikro-

¹ Vasilieff S. Global Renewable Energy Trends. Solar and Wind Move from Mainstream to Preferred, 2018.

² Waloszek W., Zawadzka Z. Eksploracyjna analiza danych, 2024.

³ Stapleton G., Neill S. Grid-Connected Solar Electric Systems. Earthscan, 2012.

⁴ Asnil A., Krismadinata K., Husnaini I., Hazman H., Astrid E. Real-Time Monitoring System Using IoT for Photovoltaic Parameters, 2023.

⁵ Emamian M., Eskandari A., Aghaei M., Nedaei A., Sizkouhi A., Milimonfared J. Cloud Computing and IoT Based Intelligent Monitoring System for Photovoltaic Plants Using Machine Learning Techniques, 2022.

⁶ Pedrycz W., Gomide F. Fuzzy Systems Engineering Toward Human-Centric Computing. Wiley, 2007.

⁷ Supatmi S., Sumitra D. Mamdani Fuzzy Inference System Using Three Parameters for Flood Disaster Forecasting, 2019.

procesorowych. Szczególnie istotne jest uwzględnienie nadwyżek energii oraz ich efektywnego wykorzystania w czasie rzeczywistym.

Celem pracy było opracowanie i weryfikacja systemu automatycznego sterowania urządzeniami gospodarstwa domowego, uwzględniającego profil produkcji energii z instalacji fotowoltaicznej. W proponowanym rozwiązaniu zastosowano algorytm logiki rozmytej typu Mamdaniego, którego wejściami są intensywność nasłonecznienia oraz indeks nadprodukcji energii wyznaczony na podstawie danych historycznych. Opracowany algorytm zaimplementowano w środowisku Matlab-Simulink⁸, a następnie w sterowniku sprzętowym opartym na mikrokontrolerze.

Wkładem pracy jest zaproponowanie metody sterowania uwzględniającej sezonowy charakter produkcji energii poprzez wprowadzenie indeksu nadprodukcji oraz integracja modelu symulacyjnego z rzeczywistym układem sterowania. Przeprowadzone badania obejmowały analizę danych eksploatacyjnych instalacji fotowoltaicznej, symulacje komputerowe oraz weryfikację eksperymentalną działania systemu.

Materialy i metody badań

Badania przeprowadzono na podstawie danych eksploatacyjnych instalacji fotowoltaicznej zlokalizowanej w gospodarstwie domowym w Polsce. Instalacja składała się z 30 monokrystalicznych modułów fotowoltaicznych o mocy jednostkowej 320 Wp, co odpowiadało mocy znamionowej 9,6 kWp. System wyposażony był w falownik o mocy 10 kW oraz układ monitorowania umożliwiający rejestrację parametrów pracy w ujęciu godzinowym.

Analizie poddano dane z okresu jednego roku, zawierające informacje o produkcji energii elektrycznej, zużyciu własnym, energii pobieranej z sieci oraz energii oddawanej do sieci. W celu identyfikacji charakterystycznych profili pracy instalacji zastosowano eksploracyjną analizę danych (EDA) oraz metody grupowania, w tym hierarchiczną metodę Warda⁹. Na tej podstawie określono sezonową zmienność produkcji energii oraz wyznaczono indeks nadprodukcji energii elektrycznej.

Na podstawie uzyskanych danych opracowano model sterowania wykorzystujący logikę rozmytą typu Mamdaniego. Jako zmienne wejściowe przyjęto intensywność nasłonecznienia oraz indeks nadprodukcji energii, natomiast zmienną wyjściową stanowiła liczba urządzeń uruchamianych w danym przedziale czasu. Model sterowania opracowano i zweryfikowano w środowisku Matlab-Simulink.

W celu oceny skuteczności proponowanego rozwiązania przeprowadzono symulacje komputerowe dla różnych poziomów nadprodukcji energii. Następnie opracowany algorytm zaimplementowano w sterowniku sprzętowym opartym na mikrokontrolerze ATmega328¹⁰ (platforma Arduino), tworząc fizyczny prototyp systemu sterowania.

⁸ Dingyü X., YangQuan C. *System Simulation Techniques with MATLAB and Simulink*. Wiley, 2014.

⁹ Chapman A. *Principles and Methods of Data Cleaning Primary Species and Species Occurrence Data*, 2005.

¹⁰ Monk S. *Arduino dla początkujących – kolejny krok*. Helion, 2015.

Poprawność działania systemu zweryfikowano eksperymentalnie w warunkach laboratoryjnych.

Algorytm sterowania

Opracowany system sterowania oparto na modelu logiki rozmytej typu Mamdaniego, umożliwiającym podejmowanie decyzji w warunkach niepewności oraz zmienności parametrów wejściowych. Zastosowanie logiki rozmytej pozwala na odwzorowanie heurystycznych reguł sterowania oraz uwzględnienie nieliniowych zależności pomiędzy wielkościami opisującymi pracę instalacji fotowoltaicznej.

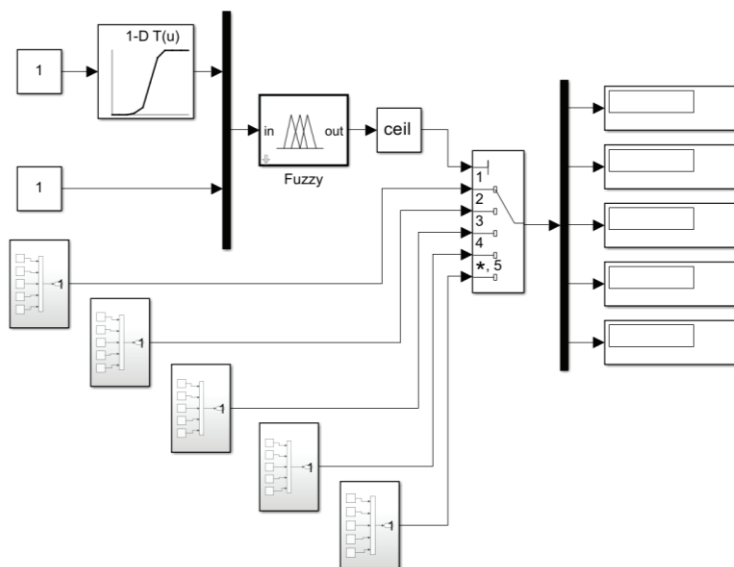
Jako zmienne wejściowe przyjęto: (i) intensywność nasłonecznienia oraz (ii) indeks nadprodukcji energii elektrycznej. Indeks nadprodukcji wyznaczono na podstawie analizy historycznych danych eksploatacyjnych, uwzględniając sezonową zmienność produkcji energii¹¹. Parametr ten opisuje zależność pomiędzy bieżącą produkcją energii a zapotrzebowaniem gospodarstwa domowego i stanowi miarę dostępnej nadwyżki energii.

Zmienną wyjściową modelu jest liczba urządzeń elektrycznych uruchamianych w danym przedziale czasu. Wartość ta określa poziom wykorzystania energii nadprodukowanej i jest bezpośrednio związana z procesem zwiększania autokonsumpcji energii.

Dla wszystkich zmiennych zastosowano funkcje przynależności o charakterze trapezoidalnym, zapewniające płynne przejścia pomiędzy poszczególnymi stanami. Zmiennym wejściowym przypisano lingwistyczne wartości opisujące poziomy niskie, średnie i wysokie, natomiast zmiennej wyjściowej odpowiadają poziomy liczby aktywowanych urządzeń. Relacje pomiędzy zmiennymi wejściowymi i wyjściową opisano za pomocą bazy reguł sterowania, zdefiniowanej w postaci reguł typu IF–THEN. Reguły te odzwierciedlają zależność pomiędzy dostępnością energii (wynikającą z poziomu nasłonecznienia i nadprodukcji) a decyzją o uruchomieniu określonej liczby urządzeń. W przypadku wysokich wartości obu parametrów wejściowych system dąży do maksymalizacji wykorzystania energii poprzez uruchomienie większej liczby odbiorników, natomiast przy niskich wartościach ogranicza ich liczbę. Wnioskowanie rozmyte przeprowadzono z wykorzystaniem metody Mamdaniego, a proces defuzyfikacji zrealizowano przy użyciu metody środka ciężkości. Otrzymany sygnał wyjściowy poddano dyskretyzacji, uzyskując liczbę urządzeń przeznaczonych do uruchomienia.

Opracowany algorytm zaimplementowano w środowisku Matlab-Simulink, a następnie wykorzystano jako podstawę do budowy modelu symulacyjnego oraz implementacji w sterowniku sprzętowym. Strukturę modelu symulacyjnego opracowanego w środowisku Matlab-Simulink przedstawiono na rysunku 1. Model obejmuje blok sterownika rozmytego, którego zadaniem jest wyznaczenie sygnału sterującego na podstawie wartości wejściowych, oraz elementy przetwarzania sygnału wyjściowego, w tym jego dyskretyzację. Uzyskany sygnał sterujący wykorzystywany jest do załączenia odpowiedniej liczby odbiorników energii.

¹¹ Kolańska-Płuska J., Gallus A. Analiza statystyczna danych do prognozowania produkcji energii elektrycznej w wybranym systemie fotowoltaicznym, 2022.

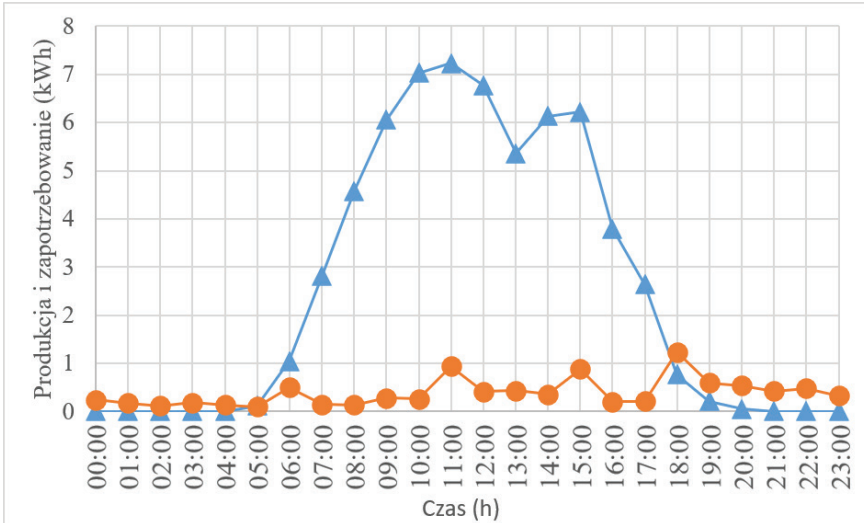


Rysunek 1. Model symulacyjny układu sterowania opracowany w środowisku Matlab-Simulink

Zastosowana struktura umożliwia modyfikację parametrów sterowania oraz analizę wpływu zmiennych wejściowych na działanie systemu.

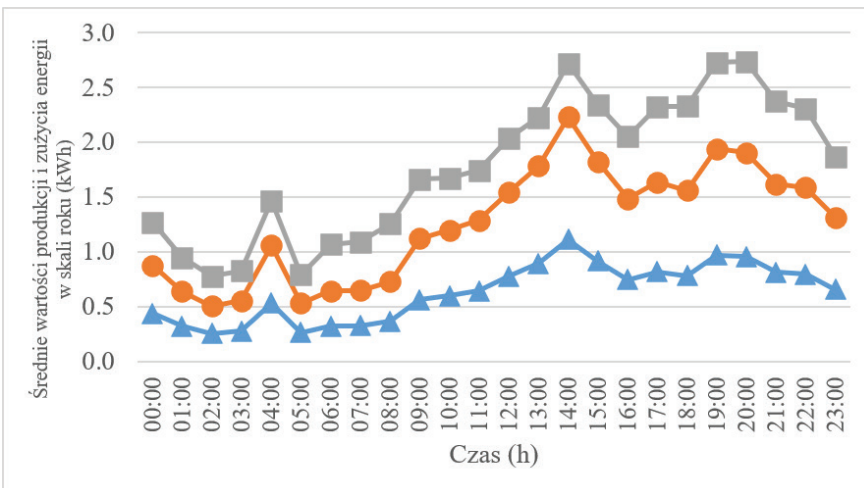
Wyniki badań

Przeprowadzona analiza danych eksploatacyjnych instalacji fotowoltaicznej wykazała istotną zmienność profilu produkcji energii w skali dobowej i rocznej. W większości analizowanych przypadków obserwowano występowanie nadwyżek energii elektrycznej w godzinach największego nasłonecznienia, które nie były bezpośrednio wykorzystywane w gospodarstwie domowym i były oddawane do sieci elektroenergetycznej. Przykładowy dobowy profil produkcji i zużycia energii elektrycznej przedstawiono na rysunku 2.



Rysunek 2. Przykładowy dobowy profil produkcji i zużycia energii elektrycznej
(● – zapotrzebowanie, ▲ – produkcja)

Zastosowanie metod eksploracyjnej analizy danych oraz grupowania umożliwiło identyfikację charakterystycznych okresów produkcji energii. Analiza wykazała wyraźną zależność pomiędzy poziomem produkcji energii a sezonowością oraz intensywnością nasłonecznienia. Najwyższe wartości nadprodukcji odnotowano w miesiącach wiosenno-letnich, natomiast najniższe w okresie jesienno-zimowym. Średnie wartości produkcji i zużycia energii w skali roku przedstawiono na rysunku 3.

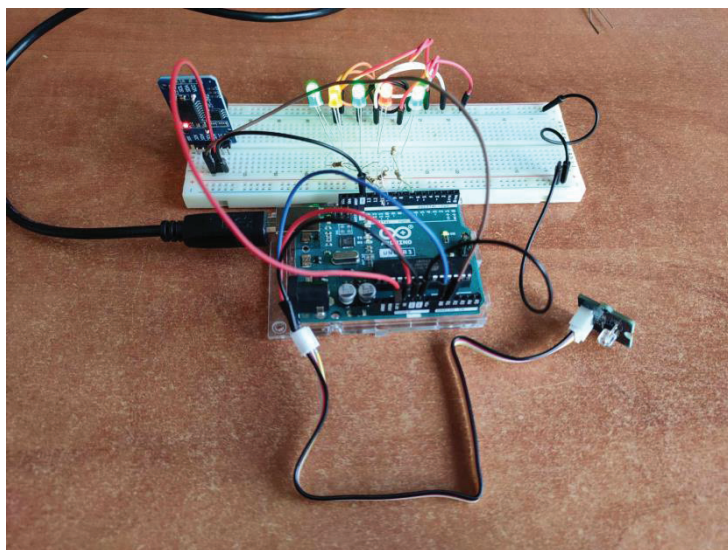


Rysunek 3. Średnie wartości produkcji i zużycia energii w skali roku
(■ – dni robocze, ● – święta, ▲ – soboty)

Na podstawie uzyskanych wyników opracowano scenariusze sterowania odpowiadające różnym poziomom nadprodukcji energii (niski, średni, wysoki). Wyniki symulacji komputerowych wykazały, że zastosowanie proponowanego algorytmu umożliwia efektywne dopasowanie liczby uruchamianych urządzeń do aktualnych warunków pracy instalacji. W przypadku wysokiej nadprodukcji algorytm dążył do maksymalnego wykorzystania dostępnej energii poprzez aktywację większej liczby odbiorników, natomiast przy niskiej nadprodukcji ograniczał ich liczbę.

Wyniki symulacji wskazują na możliwość znaczącego ograniczenia ilości energii oddawanej do sieci poprzez jej bieżące wykorzystanie w gospodarstwie domowym. W analizowanych przypadkach zaobserwowano wyraźny wzrost stopnia autokonsumpcji energii w stosunku do scenariusza bez zastosowania sterowania. Uzyskane rezultaty potwierdzają, że zastosowanie algorytmu sterowania opartego na logice rozmytej pozwala na adaptacyjne zarządzanie energią w zależności od zmiennych warunków pracy instalacji fotowoltaicznej.

Przeprowadzona weryfikacja eksperymentalna z wykorzystaniem prototypu systemu sterowania potwierdziła poprawność działania opracowanego algorytmu. System reagował zgodnie z założeniami, dostosowując liczbę uruchamianych urządzeń do wartości parametrów wejściowych. W warunkach wysokiej dostępności energii obserwowano zwiększenie liczby aktywowanych odbiorników, natomiast przy niskiej dostępności energii ich liczba była odpowiednio redukowana. Na rysunku 4 przedstawiono prototyp układu sterowania zrealizowany z wykorzystaniem platformy Arduino.



Rysunek 4. Prototyp układu sterowania bazujący na platformie Arduino

Uzyskane wyniki potwierdzają skuteczność zaproponowanego podejścia w kontekście zwiększenia autokonsumpcji energii oraz optymalizacji wykorzystania energii pochodzącej z instalacji fotowoltaicznej.

Dyskusja

Uzyskane wyniki potwierdzają, że zastosowanie algorytmu sterowania opartego na logice rozmytej stanowi skuteczne narzędzie zarządzania energią w gospodarstwach domowych wyposażonych w instalacje fotowoltaiczne. Kluczowym elementem proponowanego podejścia jest uwzględnienie zmienności produkcji energii oraz jej sezonowego charakteru poprzez wprowadzenie indeksu nadprodukcji energii.

W porównaniu do klasycznych metod sterowania, opartych na sztywnych harmonogramach pracy urządzeń, zaproponowane rozwiązanie umożliwia adaptacyjne podejmowanie decyzji w czasie rzeczywistym. Dzięki temu możliwe jest lepsze dopasowanie zużycia energii do jej aktualnej dostępności, co prowadzi do zwiększenia poziomu autokonsumpcji oraz ograniczenia energii oddawanej do sieci elektroenergetycznej.

Zastosowanie logiki rozmytej pozwala na uwzględnienie niepewności oraz zmienności parametrów wejściowych, takich jak intensywność nasłonecznienia czy chwilowa nadprodukcja energii. W przeciwieństwie do metod wymagających dokładnego modelu matematycznego, podejście to umożliwia wykorzystanie reguł heurystycznych i łatwą adaptację systemu do różnych warunków eksploatacyjnych.

Otrzymane rezultaty są zgodne z kierunkami badań prezentowanymi w literaturze, w których podkreśla się rosnące znaczenie inteligentnych systemów zarządzania energią oraz metod sztucznej inteligencji w optymalizacji pracy instalacji odnawialnych źródeł energii. W szczególności podejścia wykorzystujące dane historyczne oraz analizę profili produkcji energii wskazywane są jako istotne dla poprawy efektywności energetycznej systemów prosumenckich.

Istotnym aspektem proponowanego rozwiązania jest jego implementacja w rzeczywistym systemie mikroprocesorowym. Przeprowadzona weryfikacja eksperymentalna potwierdziła możliwość praktycznego zastosowania opracowanego algorytmu.

Należy jednak zauważyć, że przedstawione rozwiązanie posiada pewne ograniczenia. Model nie uwzględnia wszystkich czynników wpływających na zużycie energii, takich jak zmienność zachowań użytkowników czy dynamiczne taryfy energii elektrycznej. Ponadto przyjęto uproszczony model urządzeń odbiorczych, co może wpływać na dokładność odwzorowania rzeczywistych warunków pracy systemu.

W przyszłych pracach planowane jest rozszerzenie modelu o dodatkowe zmienne wejściowe oraz integracja z systemami prognozowania produkcji energii, co może przyczynić się do dalszej poprawy efektywności sterowania. Możliwe jest również zastosowanie bardziej zaawansowanych metod uczenia maszynowego w celu automatycznej optymalizacji reguł sterowania.

Podobne podejścia do monitorowania i zarządzania energią w systemach fotowoltaicznych oraz wykorzystania logiki rozmytej jako narzędzia podejmowania decyzji w warunkach niepewności są szeroko opisywane w literaturze¹².

¹² Reka S.S., Dragicevic T. Future Effectual Role of Energy Delivery: A Comprehensive Review of Internet of Things and Smart Grid. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2018.

Podsumowanie

W pracy opracowano i zweryfikowano system automatycznego sterowania urządzeniami gospodarstwa domowego z uwzględnieniem profilu produkcji energii z instalacji fotowoltaicznej. Zaproponowane rozwiązanie wykorzystuje algorytm logiki rozmytej typu Mamdaniego, którego działanie oparto na analizie intensywności nasłonecznienia oraz indeksu nadprodukcji energii wyznaczonego na podstawie danych historycznych.

Przeprowadzone badania, obejmujące analizę danych eksploatacyjnych, symulacje komputerowe oraz weryfikację eksperymentalną, potwierdziły poprawność działania opracowanego systemu oraz jego zdolność do adaptacyjnego sterowania pracą urządzeń w zależności od aktualnych warunków pracy instalacji fotowoltaicznej. Zastosowanie proponowanego podejścia umożliwia zwiększenie stopnia autokonsumpcji energii wytwarzanej lokalnie oraz ograniczenie jej oddawania do sieci elektroenergetycznej.

Istotnym osiągnięciem niniejszej pracy jest integracja modelu symulacyjnego z rzeczywistym systemem sterowania oraz wprowadzenie indeksu nadprodukcji jako parametru wspomagającego proces decyzyjny. Opracowane rozwiązanie może stanowić podstawę do dalszych badań nad inteligentnymi systemami zarządzania energią w budynkach wyposażonych w odnawialne źródła energii.

Bibliografia

- Asnil A., Krismadinata K., Husnaini I., Hazman H., Astrid E. Real-Time Monitoring System Using IoT for Photovoltaic Parameters, 2023.
- Chapman A. Principles and Methods of Data Cleaning Primary Species and Species-Occurrence Data, 2005.
- Dingyü X., YangQuan C. System Simulation Techniques with MATLAB and Simulink. Wiley, 2014.
- Emamian M., Eskandari A., Aghaei M., Nedaei A., Sizkouhi A., Milimonfared J. Cloud Computing and IoT Based Intelligent Monitoring System for Photovoltaic Plants Using Machine Learning Techniques, 2022.
- Kolańska-Płuska J., Gallus A. Analiza statystyczna danych do prognozowania produkcji energii elektrycznej w wybranym systemie fotowoltaicznym, 2022.
- Monk S. Arduino dla początkujących – kolejny krok. Helion, 2015.
- Pedrycz W., Gomide F. Fuzzy Systems Engineering Toward Human-Centric Computing. Wiley, 2007.
- Reka S.S., Dragicevic T. Future Effectual Role of Energy Delivery: A Comprehensive Review of Internet of Things and Smart Grid. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2018.
- Stapleton G., Neill S. Grid-Connected Solar Electric Systems. Earthscan, 2012.
- Supatmi S., Sumitra D. Mamdani Fuzzy Inference System Using Three Parameters for Flood Disaster Forecasting, 2019.
- Vasilieff S. Global Renewable Energy Trends. Solar and Wind Move from Mainstream to Preferred, 2018.
- Waloszek W., Zawadzka Z. Eksploracyjna analiza danych, 2024.

Adres do korespondencji: stanislaw.lis@urk.edu.pl

ORCID: Stanisław Lis 0000-0002-7813-5322
ORCID: Henryk Juszka 0000-0001-5813-0578

ETYKA W NAUCE I DYDAKTYCE

Rudolf Michalek¹, Maciej Kuboń^{2,3}

¹ Polska Akademia Nauk

² Katedra Inżynierii Produkcji Logistyki i Informatyki Stosowanej, Uniwersytet Rolniczy w Krakowie

³ Komitet Inżynierii Produkcji, Polska Akademia Nauk

Pojęcie etyka i pojęcia pochodne

W pojęciu encyklopedycznym przez etykę rozumiemy ogół ocen i norm moralnych przyjętych w danej zbiorowości społecznej, narodowej, religijnej, zawodowej. Inaczej mówiąc etyka oznacza konkretny system moralnych poglądów i zasad. W tym ujęciu etyka jest ściśle związana z moralnością i oznacza naukę o moralności mieszczącą się w dyscyplinie filozofii a ściślej w aksjologii i teorii wartości. W nauce obowiązuje podstawowa zasada etyczna: dążyć i głosić zawsze prawdę i unikać fałszu. Wynika to z podstawowej funkcji nauki, którą jest odkrywanie prawdy. Mając na uwadze ściśle powiązanie semantyczne pomiędzy etyką a prawdą godzi się w tym miejscu zwrócić uwagę na skomplikowaną naturę pojęcia prawdy. Zauważył to m.in. ks. Józef Tischner, który próbował w sposób żartobliwy tłumaczyć skomplikowane pojęcie prawdy¹.

W tym miejscu, ze względu na przyjęty cel pracy, którym jest powiązanie etyki z nauką nie będziemy zagłębiać się w skomplikowaną naturę prawd, pozostając tylko na stwierdzeniu, że choć wszyscy naukowcy poszukują w swych badaniach prawdy to dochodzą do niej tylko nieliczni przedstawiciele nauk ścisłych (matematyka, logika) gdzie stawiane tezy po udowodnieniu stają się prawdami absolutnymi². W naukach empirycznych, gdzie badanie prowadzi się tylko na małych próbach populacji i nie zawsze doskonałymi aparatami, stawiane hipotezy są tylko wyjaśniane a nie udowodniane³. Uzyskiwane wyniki badań nie mogą więc stanowić prawdy absolutnej, a tylko jej prawdopodobieństwo. Także prawda objawiona w piśmie świętym nie spełnia kryteriów naukowych aby uznać ją za prawdę absolutną. W świetle tych upowszechnionych wyjaśnień nie można przedstawicielom nauk empirycznych wytykać naruszenia zasad etyki, gdyż zgodnie z naturą nauki oni dążą do odkrywania prawdy o skomplikowanej naturze prawdy w otaczającej rzeczywistości. Wyniki ich badań są uznawane za prawdy dopóki nie zostaną obalone w procesie rozwoju nauki.

¹ Kot D. Wychowanie a prawda. Próba rekonstrukcji poglądów Józefa Tischnera. Pozyskano z: <https://www.tischner.info.pl/teksty/dk2006.pdf>

² Madalińska-Michalak J., Jeżowski J.A., Więśław Sz. Etyka w systemie edukacji w Polsce. Wydawnictwo Wolters Kluwer 2017.

³ Michalek R. Granice wolności i odpowiedzialności uczonego. Nauka, 3. Warszawa 2008.

Wymagania etyczne w stosunku do pracowników nauki

Każdego pracownika naukowego obowiązują podstawowe zasady etyki ogólnoludzkiej do dodatkowo zasady dobrych obyczajów w nauce⁴. Wynika to z faktu wyższej odpowiedzialności ze względu na wyższy stopień świadomości, a także przypisywaniu im wysokiej rangi w społecznej hierarchii i postrzeganiu ich jako autorytety w życiu społecznym⁵. W tabeli 1 przedstawiono ranking zawodów wg społecznego uznania w Polsce w roku 2025.

Tabela 1. Ranking zawodów w Polsce w roku 2025

Lp.	Zawód	% odpowiedzi
1	Ratownik medyczny	79,6
2	Strażak	78,8
3	Pilot samolotu pasażerskiego	76,9
4	Lekarz	73,0
5	Pielęgniarka	69,3
6	Farmaceuta	63,4
7	Profesor uniwersytetu	61,2
8	Strażnik graniczny	60,4
9	Górnik	58,4
10	Oficer zawodowy (kapitan)	58,3
11	Robotnik wykwalifikowany	57,0
12	Inżynier w fabryce	56,2
13	Rolnik indywidualny	55,7
14	Szewc	55,0
15	Informatyk	54,9
16	Stewardessa	54,3
17	Nauczyciel	53,0
18	Kierowca komunikacji miejskiej	52,9
19	Sędzia	51,0
20	Policjant	50,3
Inne zawody		
40	Ksiądz	30,7
43	Prezenter telewizyjny	30,2
46	Minister	25,9
48	Senator	24,2
50	Radny gminy	23,4
52	Europoseł	22,3
53	Poseł na Sejm	21,1

Źródło: <https://swresearch.pl/ranking-zawodow>

Śpośród ocenianych zawodów profesor uniwersytecki zajmuje siódme miejsce, a więc jest w czołówce ale w porównaniu z oceną przeprowadzoną w roku 2004 znacznie stracił na autorytecie społecznym, gdyż przed 21 laty był na pierwszym miejscu.

⁴ Andrzejuk A. Etyka pracownika nauki. Rocznik Tomistyczny, 3. Warszawa 2014.

⁵ Kto budzi zaufanie, a kto pozostaje na marginesie? Pozyskano z: <https://swresearch.pl/ranking-zawodow>.

Analizę i ocenę wyników ankiety pozostawiamy specjalistom z tego zakresu. Sądzymy jednak, że obniżenie pozycji uznaniowej profesora akademickiego wiąże się z wieloma przyczynami. Do najważniejszych zaliczamy: stale zmiany i to niekorzystne w ustawach o nauce i szkolnictwie wyższym, wieloletowość, handel dyplomami.

Oceniając cały ranking zawodów należy zwrócić uwagę na niską ocenę wszystkich zawodów, funkcji związanych z polityką i administracją. Tajże niską pozycję w klasyfikacji zajmują księża, którzy z natury nauczają i głoszą etykę.

Przechodząc do oceny pracowników naukowych sądzymy także, że spadek prestiżu tej grupy wynika z nadmiernych funkcji jakie są im przypisywane w życiu społecznym⁶. Należą do nich:

- pracownik naukowy jako twórca,
- jako nauczyciel i wykładowca,
- jako opiniodawca,
- jako ekspert,
- jako krzewiciel wiedzy,
- jako członek społeczeństwa i wspólnoty międzynarodowej.

Niestety z bardzo wysokimi wymaganiami nie idą proporcjonalnie wynagrodzenia, stąd ucieczka od zawodu albo poszukiwanie wieloletowości.

Ogólne zasady i wartości etyczne w każdej pracy naukowej

Wytyczne z tego zakresu zostaną przedstawione skrótowo i w punktach⁷.

1. Pracownik nauki nie może żądać od współpracowników i podwładnych zachowania sprzecznego z zasadami dobrych obyczajów w nauce.
2. Pracownik naukowy nie może usprawiedliwiać posłuszeństwem ani lojalnością sprzecznego zachowania z zasadami dobrych obyczajów w nauce.
3. Pracownik naukowy uznaje naukę za ważny składnik kultury i broni jej przed nieuzasadnionymi zarzutami.
4. Pracownik naukowy przeciwdziała złemu wykorzystywaniu osiągnięć naukowych a zwłaszcza użyciu ich przeciwko człowiekowi.
5. Pracownik naukowy ustawicznie poszerza swoją wiedzę i doskonali umiejętności.
6. Pracownik naukowy broni wolności nauki.
7. Pracownik naukowy potępia stosowanie w nauce kryteriów pozanaukowych.
8. Pracownik naukowy nie działa na szkodę reputacji zawodowej innego kolegi.
9. Pracownik naukowy nie uzależnia jakości swojej pracy od wynagrodzenia ale ma prawo domagać się godziwego wynagrodzenia.

W tej grupie zasad etycznych szczególnego napiętnowania wymagają nierzetelności w pracach naukowych. Za rażące przewinienia należy uznać:

- a) fabrykowanie,
- b) fałszowanie,
- c) plagiatowanie.

⁶ Zbiór zasad i wytycznych pt. "Dobre obyczaje w nauce". 2026. Pozyskano z: https://ken.pan.pl/images/2001_ZbiorWytycznych.pdf

⁷ Kodeks etyczny. 2026. Pozyskano z: https://ken.pan.pl/images/2001_Kodeks_Etyczny_PAN.pdf

Niestety wszystkie te rażące przypadki łamania zasad etycznych w poszukiwaniu prawdy wynikają z dążenia do awansu na skróty dla przyspieszenia własnej kariery. Z wymienionych trzech rażących wykroczeń etycznych dodatkowego wyjaśnienia wymaga plagiowanie. W tym wykroczeniu mamy plagiaty tzw. normalne i autoplgiaty. Te ostatnie nie zawsze są prawnie zabronione. Autoplgiat w postaci podwójnego publikowania w różnych czasopismach może być uznany za skuteczną drogę upowszechniania poprzez docieranie do różnych odbiorców. W takich jednak przypadkach autor winien to wyraźnie zaznaczyć publikując tę samą pracę drugi raz dla innego środowiska odbiorców.

Przykłady nieetycznego postępowania ludzi nauki

Autorzy niniejszej pracy przez wiele lat pracowali w Centralnej Komisji ds. tytułu naukowego i stopni naukowych, stąd też mieli do czynienia w ocenianiu wniosków awansowych na tytuł naukowy profesora i zatwierdzaniu prac habilitacyjnych. Z analizy tych dokumentów uznali za stosowne przytoczenia częstszych przykładów w postępowania ludzi nauki⁸⁹. Są to:

- używanie tytułów lub stopni naukowych bez uprawnienia,
- mylenie tytułów naukowych ze stanowiskiem naukowym,
- publikowanie tej samej pracy kilka razy przy zmienianiu jej tytułu (autoplgiat),
- dopisywanie się do autorstwa pracy bez żadnego udziału w jej tworzeniu i pisaniu,
- poszerzanie bibliografii o pozycje nie wykorzystane w pracy,
- przywłaszczenie cudzych twierdzeń i wniosków bez podawania ich prawdziwego źródła,
- sprzeczność pomiędzy ustną opinią jawną a pisemną decyzją w głosowaniu tajnym,
- pisanie recenzji w oparciu o autoreferaty bez sięgania do całokształtu osiągnięć,
- zgłaszanie wniosków na projekty badawcze przy pełnej świadomości, że zostały one już wykonane.

Wybrane zagadnienia bioetyki

Bioetyka jest stosunkowo nową gałęzią w problemie etyki¹⁰. Obejmuje ona obszar wiedzy teoretycznej i praktycznej wynikającej z refleksji nad etycznym wymiarem działań z zakresu fizjologii, biologii i medycyny¹¹. Jej początki datują się od lat 70-tych XX w. a za jej twórcę uznaje się profesora Pottera – onkologa amerykańskiego. Za główne zagadnienie współczesnej bioetyki przyjmuje się:

- klonowanie człowieka,
- zdobywanie embrionalnych komórek macierzystych kosztem istnienia zarodka,

⁸ Oleś P.K. O niektórych etycznych i nieetycznych obrzeżach uprawiania nauki. Nauka 4. Warszawa 2007.

⁹ Skórzewska-Amberg M. Publikacje w czasopismach naukowych – nowa odsłona nieuczciwości. Krytyka Prawa. 13. Warszawa 2022.

¹⁰ Mariański J. Nowe problemy bioetyczne w narracji społecznej. Chowanna, nr 1(58), 2022, s. 1–41, <https://doi.org/10.31261/CHOWANNA.2022.58.01>.

¹¹ Biesaga T. Podstawy zastosowania bioetyki. Wydawnictwo Naukowe Papieskiej Akademii Teologicznej. Kraków 2002.

- zapłodnienie invitro,
- selekcja eugeniczna,
- aborcja,
- doświadczenia na zwierzętach,
- wykorzystanie inżynierii genetycznej do hodowli GMO.

Trzeba obiektywnie przyznać, że problemy bioetyczne są znacznie trudniejsze w rozstrzygnięciu, gdyż część z nich nie mieści się w ogóle w nauce i brak jest podstaw moralnych i prawnych do posilkowania się w ich rozwiązywaniu. Dla przykładu postawimy pytanie: od którego momentu zarodek staje się człowiekiem? Niestety wiele narastających problemów, w tym zakresie jest wynikiem włączenia się w problemy etyczne polityki, która ostatecznie rozstrzyga o podejmowanych wnioskach.

W perspektywie trudności etycznie może sprawić sztuczna inteligencja (AI) zwłaszcza na etapie recenzowania dorobku naukowego, kto lub co jest źródłem uzyskanej prawdy¹².

Nowoczesna dydaktyka

Współczesne przemiany społeczno-ekonomiczne i kulturowe, rozwój techniczny i technologiczny, kształtowanie się społeczeństwa informacyjnego i społeczeństwa wiedzy wpływają na system edukacji, wymuszając na nim dostosowanie się do aktualnych potrzeb społeczeństwa. Termin „społeczeństwo informacyjne” dotyczy nowego typu społeczeństwa, kształtującego się dzięki szybkiemu rozwojowi technologii komunikacyjno-informacyjnych, które wykorzystywane są w sferze zawodowej i społecznej. Etap rozwoju technicznoorganizacyjnego osiągnięty przez społeczeństwo informacyjne umożliwia wykorzystanie informacji do produkcji wyrobów i świadczenia usług¹³. Społeczeństwo wiedzy jest kolejnym etapem rozwoju społeczeństwa, które swobodnie wykorzystując metody i techniki informacyjne za podstawowy czynnik umożliwiający rozwój uważa wiedzę. Realizowanie postulatów uczenia się przez całe życie jest dla funkcjonowania społeczeństwa wiedzy zasadą podstawową¹⁴. W tym kontekście konieczne jest uwzględnienie w systemie edukacji potrzeb wynikających z przedstawionych zmian. Czynniki determinujące konieczność unowocześnienia systemu edukacji można ująć również w następujące kategorie:

1. **Czynniki związane z rozwojem społeczeństwa informacyjnego** – należą do nich takie procesy, jak wzrost znaczenia nowoczesnych technologii informatycznych i informacyjno-komunikacyjnych, przekształcenia dotyczące zwiększenia zatrudnienia w sektorze usług, przede wszystkim w zakresie wytwarzania, przetwarzania oraz dystrybucji informacji, nowe wymagania wobec przedsiębiorstw i tym samym wobec pracowników oraz związane z tym zmiany w edukacji zawodowej.

¹² Wytyczne etyczne dotyczące godnej zaufania sztucznej inteligencji. 2026. Pozyskano z: <https://digital-strategy.ec.europa.eu/pl/library/ethics-guidelines-trustworthy-ai>.

¹³ Szymanek V. (red.), Społeczeństwo informacyjne w liczbach 2010, Ministerstwo Spraw Wewnętrznych i Administracji, Warszawa 2010.

¹⁴ Kwiatkowski S.M., Bogaj A., Baraniak B. Pedagogika pracy, Wydawnictwa Akademickie i Profesjonalne, Warszawa 2007.

2. **Czynniki związane z procesem globalizacji** – obejmują swym zakresem powstawanie globalnego rynku umożliwiającego nieograniczony przepływ usług i dóbr oraz umiędzynarodowienie handlu.

3. **Czynniki związane z przemianami cywilizacji naukowo-technicznej** – wśród nich znajduje się rozwój i upowszechnianie wiedzy naukowej oraz postęp naukowo-techniczny skutkujący z jednej strony podniesieniem jakości życia, a z drugiej niepoko-
jem i poczuciem zagrożenia¹⁵.

Wskazane czynniki warunkują nowe podejście do edukacji – przygotowanie zawo-
dowe ustępuje miejsca rozwojowi przydatności do zatrudnienia. Wśród aspektów
wspierających rozwój przydatności do wykonywania określonego zawodu uwzględnia
się umiejętności podstawowe, techniczne oraz społeczne. Umiejętności podstawowe
związane są z nabywaniem wiedzy oraz z posiadaniem zdolności i motywacji do stałego
uczenia się. Umiejętności techniczne dotyczą know-how, czyli umiejętności posługiwa-
nia się urządzeniami do kodowania, przetwarzania i wytwarzania informacji. Umiejęt-
ności społeczne obejmują swym zakresem cechy umożliwiające efektywne funkcyjono-
wanie na rynku pracy, do których należą kreatywność, odpowiedzialność, umiejętność
współpracy oraz zdolności komunikacyjne¹⁶. Współczesny system nauczania powinien
skoncentrować się na kształtowaniu i doskonaleniu wskazanych umiejętności, by wypo-
sażyć absolwentów różnorodnych typów uczelni w kompetencje dopasowane do wyma-
gań zmieniającej się rzeczywistości społecznej i gospodarczej.

Współczesny świat stawia przed nami wiele nowych wyzwań i zmusza do redefini-
cji wielu pojęć. Nie jest od tego wolna nauka. Dalszy rozwój cywilizacyjny i jakość
życia na niespotykaną dotąd skalę zależą od poziomu nauki i wiedzy społeczeństwa.
Rozwój nowoczesnych technologii i technik komputerowych sprawiły, że zniknęły
dotychczasowe bariery przestrzeni i czasu, ograniczające współpracę między uniwersyteta-
mi i instytucjami całego świata. Współpraca jest na „kliknięcie” dłonią na komputerze.

W tej nowej rzeczywistości, gdzie krzyżują się różne koncepcje i spojrzenia na
świat, różne poziomy wiedzy i nauki, gdzie różny jest stan rozwoju społecznego, go-
spodarczego i kulturalnego, niezwykle ważne jest przygotowanie społeczeństwa na
nowe wyzwania, między innymi przez kształcenie ludzi zdolnych rozumieć świat
i tworzyć rozwiązania stanowiące odpowiedź na pojawiające się problemy. Coraz po-
wszechniejsze nabywanie wiedzy i wykształcenia na poziomie wyższym oraz samo-
kształcenie przez całe życie jest dzisiaj koniecznością.

Od nauki oczekuje się by była „użyteczna”, przydatna dla gospodarki. Podkreśla się
przy tym fakt, że skoro badania naukowe finansowane są przez społeczeństwo, to po-
winny mu służyć i przynosić wymierne korzyści. Nauka kosztuje, ale jest dziś postrze-
gana, jako źródło możliwości generowania zysków i rozwoju gospodarki, współpraca
sektorów nauki i biznesu, jako szansa na podźwignięcie rodzimych gospodarek i gene-
rowanie bogactwa kraju.

Silny nacisk na pragmatyczny wymiar nauki sprawia, że pojawiają się jednocześnie
pytania o granice ingerencji podmiotów gospodarczych wspierających finansowo naukę

¹⁵ Klim-Klimaszewska A. Podstawy edukacyjne na przełomie XX i XXI wieku w świetle
raportów oświatowych, „Rozprawy Społeczne” nr 1 (V). 2011.

¹⁶ Ibidem

w działalność uniwersytetu, którego istotą jest autonomia, o granice wolności naukowej i odpowiedzialności za wyniki badań.

Wobec nowych zadań dla uczelni i rodzących się z tym wątpliwości, niezwykle wagę ma spójna polityka państwa odnośnie szkolnictwa wyższego i jego dobra organizacja. W Polsce, po boomie edukacyjnym lat dziewięćdziesiątych, nadszedł okres niżu demograficznego, rosnącej konkurencyjności uczelni wyższych oraz weryfikacji jakości kształcenia i badań naukowych. Ponadto, międzynarodowa pozycja polskich uczelni i uwarunkowania dotyczące udziału naukowców w projektach badawczych wymuszają tworzenie bardzo silnych zespołów naukowych, łączących w sobie potencjał wielu działających samodzielnie ośrodków naukowych. Inne są też oczekiwania odnośnie profilu i efektów kształcenia absolwentów wyższych uczelni¹⁷.

Etyczne aspekty pracy zawodowej

W ostatnich latach obserwujemy spontaniczne próby określenia etyki poszczególnych zawodów. Przejawem tego zjawiska są rozmaite kodeksy etyczne opracowywane, uchwalane lub proponowane w różnych środowiskach i grupach zawodowych¹⁸.

W procesie pracy zawodowej, w kontekście wielu aspektów moralnych, człowiek – poprzez rozwiązywanie swoich zadań zawodowych – wchodzi w relacje interpersonalne, z którymi wiążą się określone zobowiązania moralne. Coraz częściej, podejmując samodzielnie decyzje zawodowe, sam odpowiada za moralność swoich czynów. W kontekście swojego profesjonalizmu, podejmując się określonych zadań zawodowych, pracownik powinien przeanalizować własne możliwości, uaktualnić posiadane wiadomości, aby móc wykonywać powierzoną pracę zgodnie z obowiązującymi regułami. Wyniki pracy najczęściej służą innym. Dlatego też każda praca wymaga solidnego wykonania z wykorzystaniem typowych dla jej charakteru instrumentów. W tym kontekście zła praca będzie zaprzeczeniem wartości moralnych, działaniem na szkodę innych ludzi¹⁹.

Coraz częściej w wielu grupach zawodowych następuje formalne regulowanie zasad postępowania. Przykładem zwerbalizowanej formy postępowania etycznego może być kodeks etyczny pracownika naukowego²⁰, przysięga czy ślubowanie. Jednak w odniesieniu nie do każdego zawodu normy te są spisane. Należy jednak wskazać na powszechne przekonanie, iż ludzie nieprzestrzegający norm i zasad etycznych są traktowani zazwyczaj w swoim środowisku zawodowym niechętnie. W związku z tym niektóre grupy pracownicze same tworzą normy moralne na użytek własnych zbiorowości. Zakres stosowania reguł moralnych w danej grupie zawodowej jest uwarunkowany postawami po szczególnych jej członków, a także tradycjami w tym zakresie. Wykony-

¹⁷ Wyleżalek J., Najder-Stefaniak K., Bogacka K. Społeczne, etyczne i prawne aspekty funkcjonowania szkolnictwa wyższego w Polsce. SGGW Warszawa, 2013.

¹⁸ Kodeks etyki pracownika naukowego Polskiej Akademii Nauk (on-line). Dostęp [20.03.2026]. Pobrano z : <https://publikacje.pan.pl/dlibra/flipbook/136827>

¹⁹ Bittner B., Stępień J. Wprowadzenie do etyki zawodowej, Wydawnictwo eMPi2, Poznań 2000.

²⁰ Kodeks etyki pracownika naukowego Polskiej Akademii Nauk (on-line). Dostęp [20.03.2026]. Pobrano z : <https://publikacje.pan.pl/dlibra/flipbook/136827>.

wanie określonego zawodu kształtuje osobowość pracownika, jego nawyki i sposób zachowania, tworzy „rodziny zawodowe”, przyczynia się do tworzenia odrębnego stylu życia, kultury zawodowej, wzorców i stereotypów. Nic więc dziwnego że grupy zawodowe dążą do opracowania i wdrożenia określonych reguł moralnych, które obligują ich członków do pożądaných zachowań, które w konsekwencji tworzą prestiż danego zawodu²¹.

Ważnym zagadnieniem moralności jest etyka zawodowa, która – oprócz aspektu regulacji życia społecznego – zawiera w sobie etykę danej zbiorowości, deklarowane i stosowane wartości²². Niektórzy termin „etyka zawodowa” odnoszą do (...) *spisanych norm odpowiadających na pytanie, jak ze względów moralnych przedstawiciele danego zawodu powinni, a jak nie powinni postępować*²³. Jednak w potocznym użyciu termin ten oznacza wszelkie zasady tego typu, niezależnie od tego, czy zostały spisane, czy też mają charakter niepisany. Według Januszek i Sikory²⁴, na etykę zawodową składają się:

- właściwa dla danego zawodu konkretyzacja ogólnie uznanych w społeczeństwie wymogów moralnych,
- swoista w każdym systemie moralności zawodowej hierarchia wartości,
- swoisty, preferowany przez grupę zawodową sposób rozwiązywania konfliktów wartości moralnych.

Od tak rozumianej etyki zawodowej należy odróżnić reprezentowane przez daną grupę zawodową przekonania moralne. Warto też wyodrębnić moralność zawodową rozumianą jako postępowanie danej grupy zawodowej oceniane ze względu na kryteria moralne. Etykę zawodową, czyli owe kodeksy lub pewne ich fragmenty opracowuje się zazwyczaj z myślą o korygowaniu stanu rzeczywistego, o dostosowywaniu go do wskazanego wzorca; pragnie się, aby formułowane normy zinternalizowały się w grupie adresatów i aby znalazło to odbicie w sferze ich postępowania¹².

Etyka zawodu nauczyciela akademickiego

Rozwój cywilizacyjny przyczynił się do powstania wielu nowych zawodów, a co za tym idzie wyższych niż przeciętne wymagań etycznych względem pracowników tych zawodów. Dość powszechne jest przeświadczenie o potrzebie etyki zawodowej przede wszystkim w tych zawodach, w których przedstawiciele mają do czynienia ze sprawami dla człowieka najważniejszymi, takimi jak: życie, zdrowie, rozwój psychiczny (intelektualny i emocjonalny), dobre imię i godność osobista, poczucie bezpieczeństwa fizycznego i socjalnego. Do tych zawodów zaliczani są zazwyczaj lekarze, dziennikarze, nauczyciele, politycy, policjanci, prawnicy i żołnierze.

Etyka jest jednym z najważniejszych elementów każdego zawodu. Określa wartości, według których mamy postępować, wyznacza nam ograniczenia, które mają powodować, że będziemy lepsi. Pozwala nam odróżniać dobro od zła, sformułować normy

²¹ Wilsz J. Teoria pracy. Implikacje dla pedagogiki pracy, Wydawnictwo Impuls, Kraków, 2009.

²² Sarapata A. (red). Etyka zawodowa. Książka i Wiedza, Warszawa, 1971.

²³ Gogacz M. Czym jest etyka zawodowa, [w:] red. A. Andrzejuk, Zagadnienie etyki zawodowej. Oficyna Wydawnicza Navo, Warszawa, 1998.

²⁴ Januszek H., Sikora J. Socjologia pracy. Wydawnictwo Akademii Ekonomicznej w Poznaniu, Poznań, 1998.

moralne obowiązujące w danym środowisku²⁵. Konstruowanie norm moralnych dla danego zawodu musi wywodzić się z ogólnie przyjętych norm etycznych. Niektórzy twierdzą, że do podejmowania na gruncie zawodowym moralnie zaangażowanych rozstrzygnięć w zupełności wystarczają ogólne zasady moralne. Są one wystarczające do etycznego uprawiania zawodu. Takiego zdania był Kołakowski²⁶. Ogólnych norm moralnych nie ma zbyt wiele. Etyka zawodowa nie może ich modyfikować, nie może zmieniać hierarchii norm etyki ogólnej. Trudno sobie wyobrazić, aby na gruncie jakiegoś zawodu, miało dojść do zmiany hierarchii między zakazem „nie kłam” a zakazem „nie kradnij”. Nie jest uzasadnione przekonanie, aby odrębność zawodu wymagała jakichś norm zupełnie nowych i odmiennych. Uczciwość lekarza czy nauczyciela akademickiego nie różni się od uczciwości kupca czy policjanta, i odwrotnie. Oznacza to, że takie same mamy oczekiwania w stosunku do każdego, kto przyjął na siebie odpowiedzialność za jakieś dobro lub osobę i komu został powierzony sekret²⁷. Kołakowski uważa, że wartości, takie jak: uczciwość, rzetelność, zaufanie czy dobro mają charakter ponadczasowy i uniwersalny, i etyka jako ogół ocen i norm moralnie przyjętych w danej epoce ma też charakter uniwersalny.

Główną cechą kodeksów etyki zawodowej jest ich specjalność i odniesienie do konkretnych przypadków opartych na zasadach etyki ogólnej. Konkretyzacja kodeksów etyki zawodowej ściślej określa normy i wartości jakimi powinien posługiwać się pracownik co przekłada się na mocniejsze oddziaływanie tych zasad na pracownika. Mazurczak uważa, że kodeksy etyki zawodowej są potrzebne, gdyż zasady ogólne dają zbyt duże poczucie wolności wyboru i mniej obarczają sumienie w kwestiach decyzji moralnych. Należy brać pod uwagę fakt, że wartości ogólne takie jak „dobro czy uczciwość” każdy człowiek może rozpatrywać nieco inaczej²⁸.

Wg. Dziemidoka²⁹ pracownik naukowy we wszystkich przejawach swej działalności zawodowej powinien odznaczać się bezwzględną rzetelnością, rzetelnością wobec faktów, metod i teorii naukowych oraz wobec współpracowników całego środowiska naukowego. Istotnym elementem etyki badacza jest również jego odpowiedzialność moralna, zarówno za głoszone poglądy, jak i za skutki prowadzonych badań naukowych. Ważna cnota uczonego jest samodzielność intelektualna i niezależność jego sądów, rozumiana z jednej strony jako nienaruszająca cudzych myśli, ustaleń i praw autorskich, z drugiej zaś strony – jako niezależność głoszonych przez niego koncepcji od czynników i uwarunkowań pozanaukowych (ideologicznych, politycznych lub ekonomicznych).

²⁵ Chrapkowski A. Ogólne zasady etyki a etyka zawodowa i kodeks etyki zawodowej, <https://sim.bydgoszcz.pl/artykuly-poradniki/ogolne-zasady-etyki-a-etyka-zawodowa-i-kodeks-etyki-zawodowej.html> Dostęp [10.04.2026].

²⁶ Kołakowski R.J. O etyce, „Dialogi Polityczne” UMK, nr 5-6, 2005.

²⁷ Krakowian P. Etyka akademicka – obowiązki, powinności i dylematy (on-line). Pobrano: <http://filolog.uni.lodz.pl/krakowian/publications/Krakowian> Dostęp [10.04.2026].

²⁸ Mazurczak P. Dylematy etyczne zawodu nauczyciela akademickiego w obliczu wyzwań dla bezpieczeństwa, [w:] Wyzwania bezpieczeństwa na początku trzeciej dekady XXI wieku, red. R.S.

Kondracki i M.R. Matejuk, Uniwersytet Przyrodniczo-Humanistyczny w Siedlcach, s. 175-185, 2021.

²⁹ Dziemidok B. Etyka zawodu nauczyciela akademickiego. Studia Gdańskie. Wizje i rzeczywistość. 4, 199-203, 2007.

Istotnym aspektem etycznym pracy badawczej jest stosunek do dorobku innych uczonych i swego własnego. Naukowiec powinien pod tym względem łączyć postawę życzliwego krytycyzmu wobec prac i koncepcji innych autorów (oraz autokrytycyzmu wobec swego dorobku) z tolerancją wobec innych punktów widzenia, postaw badawczych, światopoglądów i tradycji kulturowej. Uczony nie tylko nie powinien tłumaczyć polemik i dyskusji, dotyczących także jego hipotez, ustaleń, interpretacji i koncepcji, on ma także obowiązek moralny sprzyjać swobodnej wymianie myśli i bronić wolności słowa i wypowiedzi, bo bez tego nauka przestaje się rozwijać i obumiera. Istotna kwestia etyczna w pracy badawczej jest rygorystycznie uczciwe przestrzeganie zasad autorstwa i współautorstwa publikacji naukowych. Do współautorów nie powinny być zaliczane osoby, które autentycznie nie uczestniczyły w tworzeniu koncepcji badań, w samych badaniach oraz interpretacji osiągniętych efektów.

W odróżnieniu od uczonych zajmujących się wyłącznie pracą badawczą bardzo ważną częścią etyki zawodowej nauczyciela akademickiego są normy etyczne związane z realizowaniem obowiązków dydaktycznych. Nie ulega wątpliwości, że nauczyciel akademicki – jak każdy nauczyciel – powinien sumiennie i systematycznie wywiązywać się ze swoich obowiązków dydaktycznych, dotyczących treści programowych, zakresu, wymiaru i terminów prowadzonych przez siebie zajęć i konsultacji. Za wykonywanie swych obowiązków dydaktycznych nauczyciel akademicki nie powinien przyjmować żadnych korzyści majątkowych lub osobistych od studentów i ich rodzin.¹⁷

Poza przestrzeganiem elementarnych zasad etyki nauczycielskiej nauczyciel akademicki winien brać pod uwagę konieczność częściowego modyfikowania zasad uniwersalnych z tego powodu, że przekazuje studentom wiedzę wyższego poziomu – pogłębianą, poszerzoną oraz, z reguły, wyspecjalizowaną. W związku z tym obowiązkiem etycznym nauczyciela akademickiego jest konieczność stałego aktualizowania swej wiedzy, by przekazywać słuchaczom najnowszy jej stan, stosując najbardziej efektywne oraz innowacyjne metody nauczania.

Osobisty stosunek nauczyciela do słuchaczy powinien być nacechowany życzliwością i taktem. Niedopuszczalne jest używanie w stosunku do studentów obraźliwych słów i złośliwych komentarzy, konieczne jest natomiast respektowanie różnic płci, charakterów, osobowości i możliwości intelektualnych. Szczególnie ważne jest przestrzeganie zasad bezstronności i sprawiedliwości przy egzaminach oraz innych sprawdzianach wiedzy studentów. Nauczyciel akademicki nie może przy ocenianiu wiedzy studentów kierować się swymi osobistymi sympatiami lub antypatiami, związanymi z osobowością, płcią, przynależnością etniczną, światopoglądem lub orientacją polityczną egzaminowanych. Życzliwość i obiektywizm w ocenach pracy studentów powinien łączyć się jednak z bezwzględnym tępieniem wszelkich przejawów nieuczciwości intelektualnej, plagiatstwa i fałszowania wyników badań naukowych. Jednym z podstawowych obowiązków nauczyciela akademickiego jest uczenie słuchaczy właściwych zasad dyskusji naukowej i niepozbawianie ich prawa do wyrażania wątpliwości co do jego poglądów oraz prawa oceny jego pracy naukowej i dydaktycznej jak również postawy nauczycielskiej. Zajęcia dydaktyczne prowadzone przez nauczyciela akademickiego nie powinny być przez niego wykorzystywane do podważania autorytetu naukowego i osobowego jego kolegów.¹⁷

Podsumowanie

Etyka w nauce i dydaktyce stanowi fundament prawidłowego funkcjonowania środowiska akademickiego oraz warunek zachowania społecznego zaufania do nauki. Jej podstawowym celem jest ochrona wartości, takich jak prawda, uczciwość, rzetelność, odpowiedzialność i szacunek wobec człowieka. Szczególne znaczenie etyka odgrywa w działalności naukowej, gdzie proces poznawczy opiera się na poszukiwaniu prawdy oraz przestrzeganiu zasad dobrych praktyk badawczych. Pracownik naukowy powinien nie tylko dążyć do ciągłego rozwoju własnych kompetencji, lecz także przeciwdziałać wszelkim przejawom nierzetelności naukowej, takim jak fabrykowanie wyników badań, fałszowanie danych czy plagiat.

Współczesne przemiany cywilizacyjne, rozwój technologii informacyjnych oraz rosnące znaczenie gospodarki opartej na wiedzy stawiają przed szkolnictwem wyższym nowe wyzwania. Uczelnie są zobowiązane nie tylko do prowadzenia badań naukowych na wysokim poziomie, ale również do kształcenia absolwentów posiadających kompetencje odpowiadające wymaganiom dynamicznie zmieniającego się rynku pracy. W tym kontekście szczególnego znaczenia nabiera odpowiedzialność nauczyciela akademickiego za jakość przekazywanej wiedzy, stosowanie nowoczesnych metod dydaktycznych oraz nieustanne doskonalenie własnych kwalifikacji.

Etyka zawodu nauczyciela akademickiego obejmuje zarówno obowiązki związane z działalnością naukową, jak i dydaktyczną. Nauczyciel akademicki powinien kierować się zasadami bezstronności, sprawiedliwości, życzliwości i szacunku wobec studentów, jednocześnie konsekwentnie przeciwdziałając wszelkim przejawom nieuczciwości intelektualnej. Szczególnie istotne jest kształtowanie postaw opartych na odpowiedzialności, krytycznym myśleniu oraz poszanowaniu zasad rzetelnej dyskusji naukowej. W dobie postępu technologicznego, globalizacji oraz rozwoju sztucznej inteligencji pojawiają się również nowe wyzwania etyczne, dotyczące zarówno prowadzenia badań naukowych, jak i procesu dydaktycznego. Wymagają one ciągłej refleksji nad granicami odpowiedzialności naukowca, autonomią uczelni oraz sposobami wykorzystania nowych technologii w sposób zgodny z dobrem człowieka i interesem społecznym.

Podsumowując, etyka w nauce i dydaktyce nie jest jedynie zbiorem formalnych norm i zasad, lecz stanowi podstawę budowania kultury akademickiej opartej na zaufaniu, odpowiedzialności i poszanowaniu prawdy. Od poziomu etycznego środowiska naukowego zależy nie tylko jakość badań i kształcenia, ale również autorytet uczelni oraz rola nauki w rozwoju społecznym, gospodarczym i cywilizacyjnym współczesnego świata.

Bibliografia

- Andrzejuk A. Etyka pracownika nauki. Rocznik Tomistyczny, 3. Warszawa 2014.
- Biesaga T. Podstawy zastosowania bioetyki. Wydawnictwo Naukowe Papierskiej Akademii Teologicznej. Kraków 2002.
- Bittner B., Stępień J. Wprowadzenie do etyki zawodowej, Wydawnictwo eMPi2, Poznań 2000.
- Chrapkowski A. Ogólne zasady etyki a etyka zawodowa i kodeks etyki zawodowej, <https://sim.bydgoszcz.pl/artykuly-poradniki/ogolne-zasady-etyki-a-etyka-zawodowa-i-kodeks-etyki-zawodowej.html> Dostęp [10.04.2026].

- Dziemidok B. Etyka zawodu nauczyciela akademickiego. Studia Gdańskie. Wizje i rzeczywistość. 4, 199-203, 2007.
- Gogacz M. Czym jest etyka zawodowa, [w:] red. A. Andrzejuk, Zagadnienie etyki zawodowej. Oficyna Wydawnicza Navo, Warszawa, 1998.
- Januszek H., Sikora J. Socjologia pracy. Wydawnictwo Akademii Ekonomicznej w Poznaniu, Poznań, 1998.
- Klim-Klimaszewska A. Podstawy edukacyjne na przełomie XX i XXI wieku w świetle raportów oświatowych, „Rozprawy Społeczne” nr 1 (V). 2011.
- Kodeks etyczny. 2026. Pozyskano z: https://ken.pan.pl/images/2001_Kodeks_Etyczny_PAN.pdf
- Kodeks etyki pracownika naukowego Polskiej Akademii Nauk (on-line). Dostęp [20.03.2026]. Pobrano z : <https://publikacje.pan.pl/dlibra/flipbook/136827>.
- Kołąkowski R.J. O etyce, „Dialogi Polityczne” UMK, nr 5-6, 2005.
- Kondracki i M.R. Matejuk, Uniwersytet Przyrodniczo-Humanistyczny w Siedlcach, s. 175-185, 2021.
- Kot D. Wychowanie a prawda. Próba rekonstrukcji poglądów Józefa Tischnera. Pozyskano z: <https://www.tischner.info.pl/teksty/dk2006.pdf>
- Krakowian P. Etyka akademicka – obowiązki, powinności i dylematy (on-line). Pobrano: <http://filolog.uni.lodz.pl/krakowian/publications/Krakowian> Dostęp [10.04.2026].
- Kto budzi zaufanie, a kto pozostaje na marginesie? Pozyskano z: <https://swresearch.pl/ranking-zawodow>.
- Kwiatkowski S.M., Bogaj A., Baraniak B. Pedagogika pracy, Wydawnictwa Akademickie i Profesjonalne, Warszawa 2007.
- Madalińska-Michalak J., Jeżowski J.A., Więśław Sz. Etyka w systemie edukacji w Polsce. Wydawnictwo Wolters Kluwer 2017.
- Mariański J. Nowe problemy bioetyczne w narracji społecznej. Chowanna, 1(58), Warszawa 2022, s. 1–41, <https://doi.org/10.31261/Chowanna.2022.58.01>.
- Mazurczak P. Dylematy etyczne zawodu nauczyciela akademickiego w obliczu wyzwań dla bezpieczeństwa, [w:] Wyzwania bezpieczeństwa na początku trzeciej dekady XXI wieku, red. R.S.
- Michalek R. Granice wolności i odpowiedzialności uczącego. Nauka, 3. Warszawa 2008.
- Oleś P.K. O niektórych etycznych i nieetycznych obrzeżach uprawiania nauki. Nauka 4. Warszawa 2007.
- Sarapata A. (red). Etyka zawodowa. Książka i Wiedza, Warszawa, 1971.
- Skórzewska-Amberg M. Publikacje w czasopismach naukowych – nowa odsłona nieuczciwości. Krytyka Prawa. 13. Warszawa 2022.
- Szymanek V. (red.), Społeczeństwo informacyjne w liczbach 2010, Ministerstwo Spraw Wewnętrznych i Administracji, Warszawa 2010.
- Wilsz J. Teoria pracy. Implikacje dla pedagogiki pracy, Wydawnictwo Impuls, Kraków, 2009.
- Wyleżałek J., Najder-Stefaniak K., Bogacka K. Społeczne, etyczne i prawne aspekty funkcjonowania szkolnictwa wyższego w Polsce. SGGW Warszawa, 2013.
- Wytyczne etyczne dotyczące godnej zaufania sztucznej inteligencji. 2026. Pozyskano z: <https://digital-strategy.ec.europa.eu/pl/library/ethics-guidelines-trustworthy-ai>.
- Zbiór zasad i wytycznych pt. "Dobre obyczaje w nauce". 2026. Pozyskano z: https://ken.pan.pl/images/2001_ZbiorWytycznych.pdf

Adres do korespondencji: maciej.kubon@urk.edu.pl

ORCID: Maciej Kuboń 0000-0003-4847-8743

ORCID: Rudolf Michalek 0009-0005-7008-9244

UWARUNKOWANIA PRAWNE, TECHNICZNE I TECHNOLOGICZNE FUNKCJONOWANIA BIOGAZOWNI W POLSCE I UE

Elżbieta Olech¹

¹ Katedra Inżynierii Produkcji Logistyki i Informatyki Stosowanej, Wydział Inżynierii Produkcji i Energetyki, Uniwersytet Rolniczy w Krakowie

Wprowadzenie

Biogazownie stają się coraz ważniejszym elementem transformacji energetycznej, ponieważ łączą funkcję wytwarzania energii odnawialnej z zagospodarowaniem odpadów organicznych, produkcją nawozów z pofermentu oraz ograniczaniem emisji gazów cieplarnianych¹. W warunkach Unii Europejskiej ich znaczenie wykracza dziś poza klasyczne ramy OZE i obejmuje także gospodarkę o obiegu zamkniętym, bezpieczeństwo energetyczne oraz politykę surowcową, szczególnie w kontekście biometanu i wykorzystania substratów odpadowych oraz pozostałościowych². W Polsce rozwój sektora był przez długi czas ograniczany przez bariery administracyjne, rozproszone regulacje i niepewność inwestycyjną, choć ostatnie zmiany prawne wskazują na wyraźne przyspieszenie działań legislacyjnych w tym obszarze³.

Celem niniejszego opracowania jest przedstawienie najważniejszych uwarunkowań prawnych, technicznych i technologicznych funkcjonowania biogazowni w UE i Polsce oraz wskazanie, w jaki sposób regulacje te wpływają na wybór substratów, model eksploatacji i kierunki rozwoju sektora⁴. Szczególna uwaga zostanie zwrócona na ewolucję prawa unijnego, zwłaszcza przepisów dotyczących odnawialnych źródeł energii, zrównoważonego wykorzystania biomasy oraz ograniczania surowców konkurujących z produkcją żywności i pasz⁵. Istotne znaczenie ma również polska ustawa z 13.07.2023 r. dotycząca ułatwień w przygotowaniu i realizacji inwestycji w zakresie biogazowni rolniczych, która zmienia praktyczne warunki inwestowania i funkcjonowania takich instalacji⁶.

Analiza ma charakter przeglądowy i opiera się na literaturze naukowej, materiałach eksperckich oraz aktach prawnych UE i Polski⁷. W ujęciu problemowym rozdział poka-

¹ Czerwińska E., Kalinowska K., Piskier T., Lokalizacyjne, prawne, ekologiczne i ekonomiczne aspekty budowy i działania biogazowni, CEJSH, Biogazownie, Krajowa Sieć Obszarów Wiejskich, 2014.

² Nowe regulacje prawne wspierające inwestycje w biogazownie rolnicze, Numer Energetyki, 2023.

³ Błażejowska, A., Prawne aspekty funkcjonowania biogazowni rolniczych, 2020.

⁴ Błażejowska, A., 2020, ibidem.

⁵ Błażejowska A., 2020, ibidem.

⁶ Ustawa z dnia 13 lipca 2023 r. o ułatwieniach w przygotowaniu i realizacji inwestycji w zakresie biogazowni rolniczych oraz ich funkcjonowaniu.

⁷ Błażejowska A., 2020, ibidem.

zuje, że biogazownie nie są już wyłącznie instalacjami produkcyjnymi, lecz stają się ogniwem szerszego systemu transformacji energetycznej, rolniczej i środowiskowej⁸. Z tego względu analiza prowadzona była równolegle na poziomie normatywnym, technicznym i technologicznym, co pozwala uchwycić zarówno ramy prawne, jak i praktyczne warunki rozwoju sektora⁹.

Metodyka badawcza

Niniejsze opracowanie ma na celu analizę prawnych, technicznych i technologicznych uwarunkowań funkcjonowania biogazowni w UE i Polsce, ze szczególnym uwzględnieniem ewolucji regulacji dotyczących substratów i modeli eksploatacji¹⁰. Przedmiotem badań jest system normatywny UE i Polski kształtujący warunki inwestycyjne i operacyjne biogazowni, w tym dyrektywy RED II i RED III, ustawa o OZE oraz ustawa z 13 lipca 2023 r. o ułatwieniach w zakresie biogazowni rolniczych¹¹.

Zakres analizy obejmuje trzy główne obszary:^{12,13}

- ramy prawne na poziomie UE i Polski,
- uwarunkowania techniczne procesów fermentacji metanowej,
- technologie wykorzystania biogazu i biometanu.

Główne problemy badawcze sformułowano następująco: Jak regulacje UE i polskie wpływają na wybór substratów w biogazowniach? Jakie są techniczne i technologiczne bariery rozwoju sektora w Polsce? Jakie perspektywy otwiera preferencja dla substratów odpadowych i pozostałościowych¹⁴?

Zastosowano metody typowe dla prac prawno-inżynierskich: analizę aktów prawnych, dogmatyczną analizę norm prawnych UE i polskiego porządku prawnego, przegląd literatury naukowej i branżowej oraz analizę dokumentów instytucjonalnych^{15,16}. Źródła wykorzystano w trzech kategoriach:¹⁷

- akty prawne i dokumenty urzędowe,
- publikacje naukowe i raporty eksperckie,
- materiały branżowe i statystyczne KOWR oraz UE.

⁸ Biogazownie, KSOW, Raport Biogaz w Polsce 2020.

⁹ Błażejowska A., 2020, ibidem.

¹⁰ Nowe regulacje prawne wspierające inwestycje w biogazownie rolnicze, Numer Energetyki, 2023. https://yadda.icm.edu.pl/baztech/element/bwmeta1.element.baztech-a0a372a5-81df-4675-bfcc-ff9fa1a2794d/c/NE_5-6_2023_98-101.pdf

¹¹ Ustawa z dnia 13 lipca 2023 r. o ułatwieniach w przygotowaniu i realizacji inwestycji w zakresie biogazowni rolniczych oraz ich funkcjonowaniu. Dz.U. 2023 poz. 1597.

¹² Lokalizacyjne, prawne, ekologiczne i ekonomiczne aspekty budowy i działania biogazowni, CEJSH, 2014. <http://cejsh.icm.edu.pl/cejsh/element/bwmeta1.element.desklight-f561d6dc-1bdc-4b0f-bbe9-deeb4a53c8ee?printView=true>

¹³ Raport Biogaz w Polsce 2020, Magazyn Biomasa, 2021.

¹⁴ Nowe regulacje prawne wspierające inwestycje w biogazownie rolnicze, 2023.

¹⁵ Metodyka pisemnych prac naukowych, 2019.

¹⁶ Błażejowska A., 2020, ibidem.

¹⁷ Biogazownie, 2020, ibidem.

Analiza ma charakter jakościowy i syntezujący, z elementami porównawczymi między UE a Polską^{18,19}. Ograniczeniem pracy jest brak danych empirycznych własnych, co wynika z charakteru przeglądowego rozdziału monograficznego²⁰.

Uwarunkowania prawne funkcjonowania biogazowni w UE

Podstawą funkcjonowania biogazowni w UE jest dyrektywa (UE) 2018/2001 w sprawie promowania energii ze źródeł odnawialnych (RED II), która definiuje biogaz jako gaz otrzymywany w procesie fermentacji metanowej i biometan jako oczyszczony biogaz o parametrach gazu ziemnego²¹. Dyrektywa ta ustala cele krajowe dla udziału OZE i wprowadza załącznik IX, w którym wyróżniono preferowane surowce do produkcji zaawansowanych biopaliw i biogazu: odpady rolnicze, odchody zwierzęce, frakcja biomasy odpadów komunalnych i przemysłowych, słoma, łuski kukurydzy oraz inne pozostałości²². Surowce te korzystają z mechanizmu podwójnego liczenia, co zwiększa ich atrakcyjność w systemach wsparcia i aukcjach OZE²³.

Dyrektywa RED III (UE) 2023/2413 zastrzega cele udziału OZE do co najmniej 42,5% do 2030 r. (z ambicją 45%) i wzmacnia kryteria zrównoważonego pozyskiwania biomasy, ograniczając wykorzystanie surowców z upraw żywnościowo-paszowych (food and feed crops) oraz wprowadzając wymogi dotyczące redukcji emisji gazów cieplarnianych dla instalacji biogazowych powyżej 2 MW²⁴. Wprowadza także preferencje dla biometanu w dekarbonizacji sektora gazowego, w tym cele REPowerEU na poziomie 35 mld m³ biometanu do 2030 r.²⁵.

Dyrektywa ILUC 2015/1513 wprowadziła limit 7% udziału biopaliw z upraw zbóż, skrobiowych, cukrowych i olejowych w energii transportowej, co pośrednio ogranicza przestrzeń regulacyjną dla biogazu z dedykowanych upraw energetycznych²⁶. Rozporządzenie delegowane 2019/807 precyzuje wygaszanie surowców wysokiego ryzyka ILUC (Indirect Land Use Change), co w praktyce pozbawia je znaczenia w systemach wsparcia i liczeniu celów OZE²⁷.

Dyrektywa odpadowa 2008/98/WE ustanawia pięciostopniową hierarchię postępowania z odpadami (zapobieganie, ponowne użycie, recykling, inne odzyskiwanie, unieszkodliwianie), promując fermentację beztlenową bioodpadów jako formę odzysku energii po

¹⁸ Nowe regulacje prawne wspierające inwestycje w biogazownie rolnicze, 2023.

¹⁹ Lokalizacyjne, prawne, ekologiczne i ekonomiczne aspekty budowy i działania biogazowni, 2014, ibidem.

²⁰ Metodyka pisemnych prac naukowych, 2019, ibidem.

²¹ Dyrektywa Parlamentu Europejskiego i Rady (UE) 2018/2001 z dnia 11 grudnia 2018 r. w sprawie promowania energii ze źródeł odnawialnych (RED II), art. 2 pkt 37.

²² Załącznik IX do Dyrektywy RED II, Część A, Sustainability criteria, European Commission.

²³ Certyfikacja biogazowni wg RED III – obowiązki i szanse, Magazyn Biomasa, 2025.

²⁴ Dyrektywa Parlamentu Europejskiego i Rady (UE) 2023/2413 z dnia 18 października 2023 r., art. 3.

²⁵ Biogas Policies in the EU: Levelling up or locking in?, EEB, Plan REPowerEU, 2025.

²⁶ Dyrektywa (UE) 2015/1513 Parlamentu Europejskiego i Rady z dnia 9 października 2015 r., art. 5.

²⁷ Rozporządzenie delegowane Komisji (UE) 2019/807 z dnia 17 grudnia 2018 r.

zaspokojeniu potrzeb materiałowych²⁸. Strategia metanowa UE (COM/2020/663) podkreśla rolę biogazowni w redukcji emisji metanu z gnojowicy i bioodpadów, wskazując je jako kluczowe technologie w ramach Europejskiego Planu Działań na rzecz Metanu²⁹. Regulacje RED II i RED III nakładają obowiązek certyfikacji biomasy, w tym biogazu, zgodnie z systemami ISCC, RSB lub REDcert, co potwierdza zgodność z kryteriami zrównoważonego rozwoju³⁰. Biogaz z załącznika IX A uzyskuje najwyższe wskaźniki redukcji GHG (do 85% w porównaniu do paliw kopalnych) i podwójne zaliczenie do celów³¹.

Uwarunkowania prawne funkcjonowania biogazowni w Polsce

Podstawą polskiego systemu regulacji biogazowni jest ustawa z dnia 20 maja 2016 r. o odnawialnych źródłach energii (Dz.U. 2023 poz. 1361), która definiuje biogaz rolniczy jako gaz otrzymywany w procesie fermentacji metanowej z surowców wymienionych w art. 2 pkt 18: substratów rolniczych, produktów ubocznych rolnictwa, odchodów zwierzęcych, odpadów i pozostałości z przetwórstwa rolno-spożywczego³². Ustawa wprowadza system aukcyjny wsparcia OZE oraz rejestry wytwórców biogazu rolniczego prowadzone przez KOWR, z obowiązkiem wykorzystywania wyłącznie dopuszczalnych substratów³³.

Ustawa z dnia 13 lipca 2023 r. o ułatwieniach w przygotowaniu i realizacji inwestycji w zakresie biogazowni rolniczych oraz ich funkcjonowaniu (Dz.U. 2023 poz. 1597) wprowadza zamknięty katalog kryteriów dla biogazowni rolniczych i szereg uproszczeń administracyjnych³⁴. Kluczowe ułatwienia obejmują: zwolnienie z obowiązku zmiany przeznaczenia gruntów rolnych do 1 ha, przyspieszone procedury przyłączeniowe do sieci, uchwałę lokalizacyjną dla instalacji powyżej 1 MW oraz uproszczenia w zagospodarowaniu pofermentu jako nawozu³⁵.

Rozporządzenie Ministra Rolnictwa i Rozwoju Wsi z dnia 12 października 2023 r. w sprawie szczegółowej listy substratów możliwych do wykorzystania w biogazowni rolniczej (Dz.U. 2023 poz. 2230) określa dopuszczalne surowce, w tym odchody zwierzęce, słomę i inne naturalne substancje pochodzące z produkcji rolniczej lub leśnej, a także produkty uboczne niebędące odpadami³⁶. Lista ta warunkuje korzystanie z ułatwień specustawy i preferuje substraty odpadowe nad dedykowanymi uprawami energetycznymi³⁷.

Nowelizacja ustawy o biokomponentach i biopaliwach ciekłych z 21 lutego 2025 r. implementuje RED II i RED III, nakładając na biogazownie powyżej 2 MW obowiązek

²⁸ Dyrektywa 2008/98/WE Parlamentu Europejskiego i Rady z dnia 19 listopada 2008 r., art. 4.

²⁹ Komunikat Komisji (COM/2020/663) - Strategia UE na rzecz redukcji emisji metanu, 2020.

³⁰ Certyfikacja biogazowni wg RED III - obowiązki i szanse, Magazyn Biomasa, 2025.

³¹ Załącznik IX do Dyrektywy RED II, Część A, Sustainability criteria, European Commission.

³² Ustawa z dnia 20 maja 2016 r. o odnawialnych źródłach energii, art. 2 pkt 18.

³³ Biogazownie rolnicze – co trzeba wiedzieć w 2024 r.?, 2024.

³⁴ Ustawa z dnia 13 lipca 2023 r. o ułatwieniach w przygotowaniu i realizacji inwestycji w zakresie biogazowni rolniczych (Dz.U. 2023 poz. 1597).

³⁵ Biogazownie rolnicze: nowe warunki od 11 września, KOWR, 2023.

³⁶ Rozporządzenie Ministra Rolnictwa i Rozwoju Wsi z dnia 12 października 2023 r. (Dz.U. 2023 poz. 2230).

³⁷ Biogazownie rolnicze, 2024, ibidem.

certyfikacji zrównoważonego rozwoju i redukcji GHG³⁸. Od 1 kwietnia 2025 r. producenci biogazu muszą spełniać kryteria KZR, co wzmacnia preferencję dla surowców z załącznika IX RED³⁹.

Krajowy Ośrodek Wsparcia Rolnictwa prowadzi rejestr wytwórców biogazu rolniczych, kontrolując zgodność z definicją substratów z ustawy o OZE⁴⁰. Naruszenie obowiązków może skutkować wykreśleniem z rejestru i utratą wsparcia⁴¹.

Uwarunkowania techniczne funkcjonowania biogazowni

Biogazownie klasyfikuje się według substratów i skali: rolnicze (gnojowica, obornik, słoma, kiszonki), komunalne (bioodpady), przemysłowe (odpady rolno-spożywcze), oczyszczalniowe (osady ściekowe) oraz składowiskowe (odpady komunalne)^{42,43}. Biogazownie rolnicze dominują w Polsce (ok. 90% instalacji), pracując w procesie fermentacji mokrej lub suchej z hydraulicznym czasem retencji 20–40 dni^{44,45}.

Typowa biogazownia składa się z: magazynu substratów, układu przygotowania wsadu (młynek, separatory), 1–4 komór fermentacyjnych (objętość 500–5000 m³), reaktora pogłębiającego, zbiorników biogazu (stalowe membrany), instalacji odsiarczania (biologicznej/chemicznej), kogeneratora CHP (500 kW–2 MW) oraz zbiorników pofermentu⁴⁶. Komory fermentacyjne pracują w warunkach mezofilnych (35–42°C) lub termofilnych (48–55°C) z izolacją termiczną i mieszadłami⁴⁷.

Efektywność zależy od: obciążenia organicznego (2–6 kg OWO/m³/d), stosunku C/N (20–30:1), pH (6,8–7,2), temperatury ($\pm 1^\circ\text{C}$ stabilności), hydraulicznego czasu retencji (20–40 dni) oraz intensywności mieszania⁴⁸. Wydajność metanowa wynosi 0,2–0,6 m³ CH₄/kg OWO, zależnie od substratu (gnojowica: 0,2–0,3; kiszonka kukurydzy: 0,35–0,45)⁴⁹.

³⁸ Nowelizacja ustawy o biokomponentach i biopaliwach ciekłych z 21 lutego 2025 r.; Certyfikacja biogazowni wg RED III.

³⁹ Certyfikacja biogazowni wg RED III – obowiązki i szanse; Biometan pod lupą prawa UE: Polska certyfikuje zieloną rewolucję energetyczną.

⁴⁰ Biogazownie rolnicze: nowe warunki od 11 września, KOWR, 2023.

⁴¹ Warunki uzyskania wpisu do rejestru KOWR, 2023.

⁴² Biogazownia - zasady działania, Bank Ochrony Środowiska, 2019.

⁴³ Planning Guide for Biogas Plants, Energypedia, 2018.

⁴⁴ Igliński B., 15 Years of the Polish agricultural biogas plants, 2020.

⁴⁵ Raport Biogaz w Polsce 2020, Magazyn biomasa, 2021.

⁴⁶ Analiza techniczno-ekonomiczna wykorzystania biogazu rolniczego, 2024.

⁴⁷ How to properly prepare a technological concept for a biogas plant?, 2024.

⁴⁸ Analiza techniczno-ekonomiczna wykorzystania biogazu rolniczego, 2024.

⁴⁹ Analiza, 2024, ibidem.

Tabela 1. Podstawowe parametry fermentacji metanowej

Parametr	Zakres optymalny	Krytyczne granice
Temperatura	35–42°C	<30°C; >50°C
pH	6,8–7,2	<6,3; >8,0
C/N	20–30:1	<15:1; >40:1
Obciążenie OWO	2–6 kg/m ³ /d	>8 kg/m ³ /d

Do najczęściej występujących problemów eksploatacyjnych w biogazowniach należą zaburzenia stabilności procesu fermentacji metanowej, które mogą prowadzić do obniżenia wydajności produkcji biogazu, pogorszenia jakości pofermentu, a w skrajnych przypadkach nawet do całkowitego zatrzymania pracy instalacji. Najczęstsze awarie obejmują zakwaszenie komory fermentacyjnej, pienienie masy fermentacyjnej, inhibicję amoniakalną, niedobory mikroelementów oraz nadmierne stężenie siarkowodoru⁵⁰.

Jednym z najpoważniejszych zagrożeń technologicznych jest zakwaszenie procesu fermentacji, związane z nadmierną akumulacją lotnych kwasów tłuszczowych (VFA – Volatile Fatty Acids). Zjawisko to występuje najczęściej w wyniku przeciążenia reaktora łatwo biodegradowalnym substratem, nagłych zmian składu wsadu lub niewłaściwego stosunku węgla do azotu (C:N). W praktyce przyjmuje się, że poziom VFA przekraczający około 4000 mg/l może prowadzić do gwałtownego spadku pH oraz zahamowania aktywności mikroorganizmów metanogennych. Konsekwencją jest obniżenie produkcji metanu, destabilizacja procesu oraz zwiększone ryzyko zatrzymania fermentacji.

Kolejnym istotnym problemem eksploatacyjnym jest pienienie masy fermentacyjnej. Zjawisko to może być wywołane nadmierną zawartością białek, tłuszczów lub detergentów w substracie, a także nieprawidłową pracą mieszadeł czy zbyt intensywnym dozowaniem wsadu. Pienienie powoduje utrudnienia w odgazowaniu komory fermentacyjnej, może prowadzić do uszkodzenia czujników, armatury oraz instalacji gazowej, a także zwiększa ryzyko przedostania się biomasy do układu odsiarczania i magazynowania biogazu. W praktyce technologicznej stosuje się środki przeciwpienne (defoamery), odpowiednie sterowanie mieszaniem oraz kontrolę parametrów substratu.

Znaczącym zagrożeniem dla stabilności procesu fermentacji jest również inhibicja amoniakalna. Wysokie stężenia jonów amonowych (NH₄⁺), przekraczające około 2000 mg/l, występują głównie podczas fermentacji substratów bogatych w białko, takich jak obornik drobiowy, odpady poubojowe czy niektóre odpady spożywcze. Nadmierne stężenie amoniaku prowadzi do ograniczenia aktywności mikroorganizmów metanogennych, obniżenia efektywności fermentacji oraz spadku produkcji biogazu. Szczególnie niebezpieczny jest wolny amoniak (NH₃), którego toksyczność wzrasta wraz z temperaturą oraz wartością pH.

⁵⁰ Planning Guide for Biogas Plants, Energypedia, 2018.

W eksploatacji biogazowni istotną rolę odgrywa również odpowiednie stężenie mikroelementów, takich jak kobalt (Co), nikiel (Ni), selen (Se) czy żelazo (Fe). Pierwiastki te uczestniczą w procesach enzymatycznych zachodzących podczas fermentacji metanowej. Ich niedobory mogą prowadzić do spowolnienia rozkładu materii organicznej, zmniejszenia aktywności bakterii metanogennych oraz niestabilności całego procesu biologicznego. Problem ten występuje szczególnie w instalacjach wykorzystujących jednorodne substraty lub odpady ubogie w składniki mineralne.

Istotnym problemem technicznym jest także obecność siarkowodoru (H_2S) w biogazie. Wysokie stężenia H_2S , przekraczające około 2000 ppm, powodują intensywną korozję urządzeń technologicznych, instalacji gazowych, silników kogeneracyjnych oraz układów przesyłowych. Dodatkowo siarkowodor stanowi zagrożenie dla bezpieczeństwa eksploatacji ze względu na swoje właściwości toksyczne i wybuchowe. Z tego względu w nowoczesnych biogazowniach stosuje się systemy odsiarczania biologicznego, chemicznego lub adsorpcyjnego.

W celu ograniczenia ryzyka awarii coraz większe znaczenie mają systemy monitoringu online umożliwiające bieżącą kontrolę parametrów technologicznych, takich jak pH, temperatura, stężenie VFA, H_2S , NH_4^+ czy skład biogazu. Stały monitoring pozwala na szybkie wykrywanie nieprawidłowości oraz podejmowanie działań korygujących jeszcze przed wystąpieniem poważnych zaburzeń procesu. Istotną rolę odgrywa również odpowiednie przygotowanie substratu (pretreatment), obejmujące m.in. homogenizację, rozdrabnianie, separację zanieczyszczeń czy pasteryzację. Działania te poprawiają jednorodność wsadu, zwiększają dostępność materii organicznej dla mikroorganizmów oraz ograniczają ryzyko biologiczne i technologiczne⁵¹.

Instalacje biogazowe należą do obiektów mogących znacząco oddziaływać na środowisko, dlatego ich projektowanie, budowa i eksploatacja podlegają licznym wymaganiom formalnoprawnym oraz środowiskowym. W przypadku instalacji o mocy przekraczającej 500 kW konieczne jest przeprowadzenie oceny oddziaływania przedsięwzięcia na środowisko oraz sporządzenie raportu oddziaływania na środowisko. Inwestor zobowiązany jest również do uzyskania decyzji o warunkach zabudowy, decyzji środowiskowej, a w określonych przypadkach także pozwolenia zintegrowanego⁵². Procedury te mają na celu ograniczenie potencjalnego wpływu biogazowni na otoczenie, w szczególności w zakresie emisji gazów, gospodarki odpadami, oddziaływania odorowego oraz ochrony wód i gleb.

Szczególne znaczenie w eksploatacji biogazowni mają wymagania dotyczące emisji gazów oraz substancji mogących negatywnie oddziaływać na środowisko. Proces fermentacji metanowej wiąże się z emisją takich związków jak siarkowodor (H_2S), amoniak (NH_3), metan (CH_4), dwutlenek węgla (CO_2) czy lotne związki organiczne (VOC). Substancje te mogą powodować uciążliwości odorowe, przyczyniać się do powstawania efektu cieplarnianego oraz stanowić zagrożenie dla zdrowia ludzi i zwierząt. Z tego względu instalacje biogazowe objęte są wymaganiami wynikającymi z Dyrektywy Parlamentu Europejskiego i Rady 2010/75/UE w sprawie emisji przemysłowych (IED – Industrial Emissions Directive), określającej zasady ograniczania emisji do powietrza oraz

⁵¹ How to properly prepare a technological concept for a biogas plant?, 2024.

⁵² Dudkowiak M., Biogas & Biomethane in Poland, 2025.

obowiązek stosowania najlepszych dostępnych technik (BAT – *Best Available Techniques*)⁵³.

W praktyce eksploatacyjnej oznacza to konieczność stosowania szczelnych fermentorów, systemów odzysku i oczyszczania biogazu, instalacji odsiarczania oraz układów ograniczających emisję odorów. Coraz częściej wykorzystywane są biofiltry, filtry węglowe oraz systemy hermetyzacji stref magazynowania substratów i pofermentu. Istotne znaczenie ma także regularna kontrola szczelności instalacji gazowej, ponieważ niekontrolowane emisje metanu wpływają negatywnie na bilans środowiskowy całej instalacji. Metan charakteryzuje się bowiem wielokrotnie wyższym potencjałem cieplarnianym niż dwutlenek węgla.

Ważnym elementem funkcjonowania biogazowni jest również właściwe zagospodarowanie pofermentu. Produkt ten, powstający po zakończeniu procesu fermentacji, może być wykorzystywany jako nawóz organiczny lub środek poprawiający właściwości gleby, jednak musi spełniać określone wymagania jakościowe oraz sanitarne. Zgodnie z Rozporządzeniem Parlamentu Europejskiego i Rady (UE) 2019/1009 dotyczącym produktów nawozowych UE, poferment powinien spełniać normy dotyczące zawartości metali ciężkich, stabilności biologicznej, obecności patogenów oraz parametrów chemicznych⁵⁴. Niewłaściwe magazynowanie lub aplikacja pofermentu mogą prowadzić do zanieczyszczenia gleb i wód gruntowych związkami azotu oraz fosforu.

Istotnym aspektem eksploatacji biogazowni są również wymagania związane z bezpieczeństwem i higieną pracy. Instalacje biogazowe zaliczane są do obiektów podwyższonego ryzyka ze względu na obecność gazów palnych, toksycznych oraz możliwość występowania atmosfer wybuchowych. Biogaz zawierający metan i siarkowodór stwarza zagrożenie pożarowe oraz wybuchowe, szczególnie w przypadku nieszczelności instalacji lub niewłaściwej wentylacji pomieszczeń technologicznych. Z tego względu konieczne jest stosowanie systemów detekcji gazów, instalacji przeciwybuchowych (ATEX), odpowiedniej wentylacji oraz procedur awaryjnych.

Pracownicy obsługujący instalacje biogazowe powinni być odpowiednio przeszkoleni w zakresie obsługi urządzeń technologicznych, postępowania w sytuacjach awaryjnych oraz zasad pracy w przestrzeniach zamkniętych. Szczególne zagrożenie stanowi siarkowodór, który nawet przy stosunkowo niewielkich stężeniach może powodować zatrucia, podrażnienia dróg oddechowych oraz utratę przytomności. Konieczne jest zatem wyposażenie personelu w środki ochrony indywidualnej, detektory gazów oraz systemy alarmowe.

Dodatkowo eksploatacja biogazowni wymaga prowadzenia regularnych przeglądów technicznych urządzeń, kontroli instalacji elektrycznych i gazowych oraz monitorowania parametrów pracy fermentorów. Wdrażanie procedur bezpieczeństwa, systemów zarządzania środowiskowego oraz nowoczesnych technologii monitoringu pozwala ograniczyć ryzyko awarii, poprawić bezpieczeństwo pracy oraz zwiększyć efektywność funkcjonowania instalacji biogazowej.

⁵³ Dudkowiak M., 2025, *ibidem*.

⁵⁴ Dudkowiak M., 2025, *ibidem*.

Uwarunkowania technologiczne funkcjonowania biogazowni

Produkcja biogazu zachodzi w wyniku wieloetapowego procesu fermentacji beztlenowej, obejmującego hydrolizę, acydogenezę, acetogenezę oraz metanogenezę. Proces ten realizowany jest przez wyspecjalizowane grupy mikroorganizmów funkcjonujących w różnych zakresach temperatur: psychrofilnym (10–25°C), mezofilnym (32–38°C) oraz termofilnym (52–55°C)⁵⁵. Najczęściej w biogazowniach rolniczych stosowana jest fermentacja mezofilna, charakteryzująca się stabilnością procesu oraz relatywnie niskimi wymaganiami energetycznymi. W zależności od rodzaju i suchej masy substratu stosuje się fermentację moką (DM <12%) lub suchą (DM 15–40%). Fermentacja mokra dominuje w instalacjach rolniczych pracujących w systemie ciągłym, natomiast fermentacja sucha wykorzystywana jest głównie do przetwarzania słomy, odpadów organicznych i bioodpadów w układach okresowych (batch). Istotnym rozwiązaniem technologicznym jest współfermentacja różnych substratów, np. gnojowicy z kiszonkami roślinnymi, co pozwala zwiększyć wydajność metanową nawet o 20–50%, poprawić bilans składników odżywczych oraz ustabilizować przebieg procesu fermentacji⁵⁶.

Surowy biogaz zawiera zazwyczaj 55–70% metanu (CH₄), 30–40% dwutlenku węgla (CO₂) oraz domieszki siarkowodoru (H₂S), pary wodnej i innych gazów śladowych. Ze względu na obecność zanieczyszczeń wymaga on oczyszczania oraz uzdatniania przed dalszym wykorzystaniem energetycznym. Proces ten obejmuje odwodnienie biogazu, desulfuryzację metodami biologicznymi lub chemicznymi oraz usuwanie CO₂ z wykorzystaniem technologii PSA, membran lub absorpcji wodnej (*water scrubbing*)⁵⁷. W wyniku uzdatniania możliwe jest uzyskanie biometanu o zawartości metanu przekraczającej 96%, który może być zatłaczany do sieci gazowej lub wykorzystywany jako paliwo transportowe w postaci bio-CNG lub bio-LNG. Najczęściej jednak biogaz wykorzystywany jest w układach kogeneracyjnych CHP, umożliwiających jednoczesną produkcję energii elektrycznej oraz ciepła przy sprawności całkowitej przekraczającej 80%.

Produktem ubocznym procesu fermentacji jest poferment, zawierający znaczące ilości składników nawozowych, głównie azotu, fosforu i potasu⁵⁸. Poferment poddawany jest zazwyczaj separacji na frakcję stałą oraz płynną. Frakcja stała może być wykorzystywana do produkcji kompostu lub nawozów organicznych, natomiast frakcja płynna stosowana jest do nawożenia pól uprawnych, również w systemach nawożenia precyzyjnego. Możliwość rolniczego wykorzystania pofermentu uzależniona jest od spełnienia wymagań środowiskowych oraz jakościowych określonych m.in. w Rozporządzeniu (UE) 2019/1009, obejmujących kontrolę zawartości metali ciężkich, patogenów oraz stabilności biologicznej produktu⁵⁹.

⁵⁵ Pilarski K., Wydajność procesu fermentacji metanowej w biogazowniach rolniczych, UP Poznań, 2019.

⁵⁶ Dach J. i in., Przegląd systemów mieszania cieczy fermentacyjnej stosowanych w biogazowniach, Technika rolnicza ogrodnicza leśna, 6, 2017.

⁵⁷ Innowacyjne technologie w budowie biogazowni, Bioplan.co, 2025.

⁵⁸ Krasuska E. Rozwijamy nowe technologie dla sektora biogazu i biometanu, NCBiR, Magazynbiomasa.pl., 2024.

⁵⁹ Rozporządzenie (UE) 2019/1009.

Bariery i perspektywy rozwoju sektora biogazowego

Mimo korzystnych regulacji, rozwój biogazowni w Polsce hamują: niestabilność systemu wsparcia (zmiany aukcyjne), długie procedury administracyjne (do 2 lat), wysokie koszty inwestycyjne (8–12 mln EUR/MW) oraz brak infrastruktury gazowej dla biometanu⁶⁰. Niska akceptacja społeczna (lokalne protesty) i niedobór substratów odpadowych (konkurencja z bioetanoem) pogłębiają problem. W 2025 r. działa ok. 150 biogazowni rolniczych, produkując <1% miks OZE⁶¹.

Niemcy (10 tys. biogazowni), Dania i Włochy osiągnęły skalę dzięki stabilnym taryfom EEG, obowiązkowemu upgradingowi i integracji z siecią gazową. Polska ma potencjał 2–3 mld m³ biogazu rocznie, ale realizuje <5%⁶².

Kluczowe kierunki: rozwój biometanu (cel 2 mld m³ do 2030 r.), klastry biogazowe zintegrowane z PV i wodorem, technologie pretreatmentu (współfermentacja, enzymy) oraz wykorzystanie pofermentu jako produktu nawozowego. Nowelizacja ustawy o OZE z 2025 r. wprowadza gwarantowane taryfy dla biometanu i aukcje dedykowane⁶³.

Tabela 3. Bariery vs szanse rozwoju

Bariera	Rozwiązanie
Koszty inwestycyjne	Klastry, dotacje NFOŚiGW
Substraty	Współfermentacja odpadów
Administracja	Specustawa biogazowa
Rynek biometanu	Obowiązkowe off-take PGNiG

Podsumowanie

Przeprowadzona analiza wykazała, że funkcjonowanie biogazowni w Polsce oraz Unii Europejskiej determinowane jest przez wzajemnie powiązane uwarunkowania prawne, techniczne i technologiczne. W ostatnich latach obserwuje się wyraźny kierunek rozwoju sektora oparty na wykorzystaniu substratów odpadowych i pozostałościowych, ograniczający udział surowców konkurujących z produkcją żywności. Szczególne znaczenie w tym zakresie mają regulacje wynikające z dyrektyw RED II i RED III oraz krajowych aktów prawnych, w tym polskiej specustawy dotyczącej biogazowni rolniczych,

⁶⁰ Bednarek A., Development barriers of agricultural biogas plants in Poland, 2023.
⁶¹ Igliński B., 15 Years of the Polish agricultural biogas plants, 2020.
⁶² Polska ma możliwości, by znaleźć się w europejskiej czołówce producentów biogazu i biometanu, Zielonagospodarka.pl, 2024.
⁶³ Biogaz w Polsce 2025 – dane i kierunki rozwoju, Wikanabioenergia.pl., 2025.

które promują wykorzystanie substratów wskazanych w załączniku IX dyrektywy RED. Jednocześnie rozwój sektora wymaga zapewnienia odpowiednich parametrów technologicznych procesu fermentacji, stabilności dostaw substratów oraz wysokiej efektywności energetycznej instalacji.

Analiza wykazała również, że współczesne technologie stosowane w biogazowniach umożliwiają nie tylko produkcję energii elektrycznej i ciepła w układach kogeneracyjnych, lecz także rozwój zaawansowanych kierunków wykorzystania biogazu, takich jak produkcja biometanu, bio-CNG czy bio-LNG. Technologie upgradingu biogazu, integracja instalacji biogazowych z odnawialnymi źródłami energii oraz rozwój systemów hybrydowych otwierają nowe możliwości rynkowe i zwiększają znaczenie biogazowni w procesie transformacji energetycznej. Coraz większą rolę odgrywa także zagospodarowanie pofermentu zgodnie z zasadami gospodarki obiegu zamkniętego, umożliwiające odzysk składników nawozowych oraz ograniczenie zużycia nawozów mineralnych.

Przeprowadzona analiza potwierdza, że biogazownie stanowią istotny element budowania bezpieczeństwa energetycznego, ograniczania emisji gazów cieplarnianych oraz rozwoju niskoemisyjnego rolnictwa. Pomimo znaczącego potencjału Polski szacowanego na 2–3 mld m³ biogazu rocznie, poziom jego wykorzystania pozostaje nadal relatywnie niski. Główne bariery rozwoju sektora obejmują skomplikowane procedury administracyjne, wysokie koszty inwestycyjne, problemy z finansowaniem oraz niepewność regulacyjną.

W związku z powyższym dalszy rozwój sektora biogazu wymaga wdrożenia stabilnych mechanizmów wsparcia dla biometanu, uproszczenia procedur administracyjnych, rozwoju lokalnych klastrów energetycznych oraz zwiększenia integracji biogazowni z innymi odnawialnymi źródłami energii. Istotne znaczenie będzie miało również rozwijanie technologii upgradingu biogazu oraz usprawnienie systemu zagospodarowania pofermentu. Realizacja tych działań może przyczynić się do zwiększenia konkurencyjności sektora, poprawy bezpieczeństwa energetycznego oraz skuteczniejszej realizacji celów klimatycznych i środowiskowych UE.

Bibliografia

- Borkowski Analiza techniczno-ekonomiczna wykorzystania biogazu rolniczego, 2024.
 Bednarek A., Development barriers of agricultural biogas plants in Poland, 2023.
 Biogaz w Polsce 2025 – dane i kierunki rozwoju, Wikanabioenergia.pl., 2025.
 Biogazownia - zasady działania, Bank Ochrony Środowiska, 2019.
 Biogazownie rolnicze: nowe warunki od 11 września, KOWR, 2023.
 Biogazownie rolnicze – co trzeba wiedzieć w 2024 r.?, 2024.
 Biogazownie, KSOW, Raport Biogaz w Polsce 2020.
 Biogas Policies in the EU: Levelling up or locking in?, EEB, Plan REPowerEU, 2025.
 Błażejowska, A., Prawne aspekty funkcjonowania biogazowni rolniczych, 2020.
 Certyfikacja biogazowni wg RED III – obowiązki i szanse, Magazyn Biomasa, 2025.
 Czerwińska E., Kalinowska K., Piskier T., Lokalizacyjne, prawne, ekologiczne i ekonomiczne aspekty budowy i działania biogazowni, CEJSH, Biogazownie, Krajowa Sieć Obszarów Wiejskich, 2014.
 Dach J. i in., Przegląd systemów mieszania cieczy fermentacyjnej stosowanych w biogazowniach, Technika rolnicza ogrodnicza leśna, 6, 2017.
 Dudkowiak M., Biogas & Biomethane in Poland, 2025.

- Dyrektywa Parlamentu Europejskiego i Rady (UE) 2018/2001 z dnia 11 grudnia 2018 r. w sprawie promowania energii ze źródeł odnawialnych (RED II), art. 2 pkt 37.
- Dyrektywa Parlamentu Europejskiego i Rady (UE) 2023/2413 z dnia 18 października 2023 r., art. 3.
- Dyrektywa 2008/98/WE Parlamentu Europejskiego i Rady z dnia 19 listopada 2008 r., art. 4.
- Dyrektywa (UE) 2015/1513 Parlamentu Europejskiego i Rady z dnia 9 października 2015 r., art. 5.
- How to properly prepare a technological concept for a biogas plant?, 2024.
- Igliński B., 15 Years of the Polish agricultural biogas plants, 2020.
- Innowacyjne technologie w budowie biogazowni, Bioplan.co, 2025.
- Komunikat Komisji (COM/2020/663) - Strategia UE na rzecz redukcji emisji metanu, 2020.
- Kowalczyk-Juśko A. Porównanie uwarunkowań ekonomiczno-prawnych produkcji biogazu rolniczego w Polsce i Niemczech, Roczniki wydziału nauk prawnych i ekonomicznych KUL Tom II, zeszyt 2, 2006.
- Krasuska E. Rozwijamy nowe technologie dla sektora biogazu i biometanu, NCBiR, Magazynbiomasa.pl., 2024.
- Lokalizacyjne, prawne, ekologiczne i ekonomiczne aspekty budowy i działania biogazowni, CEJSH, 2014. <http://cejsh.icm.edu.pl/cejsh/element/bwmeta1.element.desklight-f561d6dc-1bdc-4b0f-bbe9-deeb4a53c8ee?printView=true>
- Metodyka pisemnych prac naukowych, 2019.
- Nowe regulacje prawne wspierające inwestycje w biogazownie rolnicze, Numer Energetyki, 2023. https://yadda.icm.edu.pl/baztech/element/bwmeta1.element.baztech-a0a372a5-81df-4675-bfcc-ff9fa1a2794d/c/NE_5-6_2023_98-101.pdf
- Nowelizacja ustawy o biokomponentach i biopaliwach ciekłych z 21 lutego 2025 r.
- Pilarski K., Wydajność procesu fermentacji metanowej w biogazowniach rolniczych, UP Poznań, 2019.
- Planning Guide for Biogas Plants, Energypedia, 2018.
- Polska ma możliwości, by znaleźć się w europejskiej czołówce producentów biogazu i biometanu, Zielonagospodarka.pl, 2024.
- Raport Biogaz w Polsce 2020, Magazyn Biomasa, 2021.
- Rozporządzenie (UE) 2019/1009.
- Rozporządzenie delegowane Komisji (UE) 2019/807 z dnia 17 grudnia 2018 r.
- Rozporządzenie Ministra Rolnictwa i Rozwoju Wsi z dnia 12 października 2023 r. (Dz.U. 2023 poz. 2230).
- Ustawa z dnia 20 maja 2016 r. o odnawialnych źródłach energii, art. 2 pkt 18.
- Ustawa z dnia 13 lipca 2023 r. o ułatwieniach w przygotowaniu i realizacji inwestycji w zakresie biogazowni rolniczych oraz ich funkcjonowaniu. Dz.U. 2023 poz. 1597.
- Warunki uzyskania wpisu do rejestru KOWR, 2023.
- Załącznik IX do Dyrektywy RED II, Część A, Sustainability criteria, European Commission.

Adres do korespondencji: elzbieta.olech@urk.edu.pl

ORCID: Elżbieta Olech 0000-0003-4405-701X

FARM SUSTAINABILITY ASSESSMENT W ZARZĄDZANIU ZRÓWNOWAŻONYM ŁAŃCUCHEM DOSTAW JABŁEK. STUDIUM PRZYPADKU FMG DREHER

Robert Pierściński¹, Anna Krawczuk², Sławomir Kocira^{2,3}

¹ Dreher Poland Sp. z o.o., Warszawa, Polska

² Katedra Eksploatacji Maszyn i Zarządzania Procesami Produkcyjnymi, Wydział Inżynierii Produkcji, Uniwersytet Przyrodniczy w Lublinie, Lublin, Polska

³ Department of Landscape Management, Faculty of Agriculture and Technology, University of South Bohemia in České Budějovice, České Budějovice, Czech Republic

Wprowadzenie

Zrównoważenie rolnictwa jest obecnie jednym z kluczowych wyzwań agrobiznesu, ponieważ produkcja żywności musi łączyć efektywność ekonomiczną z ochroną zasobów naturalnych, bezpieczeństwem żywnościowym oraz odpowiedzialnością społeczną. W ujęciu FAO zrównoważone systemy żywności i rolnictwa wymagają podejścia integrującego produkcję roślinną, zwierzęcą, gospodarkę wodną, zasoby glebowe, kapitał społeczny oraz instytucjonalne mechanizmy wspierające transformację¹. Podobnie Agenda 2030 wiąże bezpieczeństwo żywnościowe, zrównoważone rolnictwo, odpowiedzialną konsumpcję i ochronę ekosystemów w jeden zbiór powiązanych celów rozwojowych².

Zrównoważone rolnictwo nie może być redukowane jedynie do ograniczania negatywnego wpływu środowiskowego. Obejmuje ono również zdolność gospodarstwa do utrzymania produktywności, stabilności dochodów, bezpieczeństwa pracy oraz odporności na zmienność rynkową i klimatyczną. Podstawą rolnictwa zrównoważonego jest wzmacnianie potencjału naturalnego, społecznego, ludzkiego i finansowego, a więc zarówno praktyki agrotechniczne, jak i organizacyjne³. Wzrost produkcji żywności powinien następować bez pogłębiania presji na ekosystemy, zdrowie publiczne i jakość zasobów środowiskowych⁴.

¹ FAO. Building a common vision for sustainable food and agriculture: Principles and approaches. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2014.

² United Nations. Transforming our world: the 2030 Agenda for Sustainable Development. A/RES/70/1. New York: United Nations, 2015.

³ Pretty, J. Agricultural sustainability: concepts, principles and evidence. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 363(1491), 447-465. <https://doi.org/10.1098/rstb.2007.2163>.

⁴ Tilman, D., Cassman, K. G., Matson, P. A., Naylor, R., & Polasky, S. Agricultural sustainability and intensive production practices. *Nature*, 418, 671-677. <https://doi.org/10.1038/nature01014>.

Znaczenie tej problematyki wzrosło w polityce Unii Europejskiej wraz z przyjęciem Europejskiego Zielonego Ładu oraz strategii „Od pola do stołu”. Strategia ta zakłada przechodzenie ku systemowi żywnościowemu, który ma neutralny lub pozytywny wpływ na środowisko, wspiera łagodzenie zmian klimatu, odwraca utratę bioróżnorodności, zapewnia bezpieczeństwo żywnościowe oraz umożliwia uczciwsze dochody uczestnikom łańcucha żywnościowego⁵. Dla podmiotów przetwórstwa owoców oznacza to konieczność lepszego dokumentowania pochodzenia surowca, praktyk produkcyjnych dostawców oraz systemów ciągłego doskonalenia.

Jednym z narzędzi praktycznego wdrażania zasad rolnictwa zrównoważonego w łańcuchach dostaw jest Farm Sustainability Assessment (FSA). FSA to zestaw narzędzi umożliwiających ocenę, poprawę i walidację wyników gospodarstw w zakresie zrównoważenia, zwykle na poziomie grup gospodarstw, z możliwością niezależnej weryfikacji poziomu Bronze, Silver lub Gold⁶. Aktualny kwestionariusz FSA 3.0 jest udostępniany w wielu językach, w tym w języku polskim, i służy do samooceny wyników gospodarstwa w obszarach prawnych, środowiskowych, społecznych i biznesowych⁷.

W przypadku sadownictwa i przetwórstwa owocowego szczególnie istotne są takie zagadnienia, jak racjonalne stosowanie środków ochrony roślin i nawozów, efektywne gospodarowanie wodą, bezpieczeństwo pracowników sezonowych, utrzymywanie dokumentacji zabiegów agrotechnicznych, identyfikowalność partii surowca oraz przejrzyste zasady współpracy z dostawcami. Problem ten staje się bardziej złożony, gdy baza dostawców jest rozproszona, a znacząca część surowca trafia do zakładu przez punkty skupu lub grupy producenckie. W takiej sytuacji pojedynczy audyt gospodarstwa nie rozwiązuje problemu zarządzania całym łańcuchem dostaw; potrzebny jest system grupowy, który pozwala łączyć samoocenę, wsparcie doradcze, dokumentację i weryfikację.

Dodatkowym kontekstem jest rosnące znaczenie krótszych łańcuchów dostaw żywności, rozumianych jako modele sprzedaży bezpośredniej lub dystrybucji z ograniczoną liczbą pośredników między producentem a odbiorcą. Skrócenie łańcuchów dostaw nie sprowadza się wyłącznie do zmniejszenia dystansu fizycznego lub liczby ogniw, lecz obejmuje także większą przejrzystość relacji rynkowych, możliwość powiązania produktu z konkretnym producentem lub obszarem pochodzenia, wzrost zaufania konsumentów, poprawę pozycji producentów oraz silniejsze lokalne zakorzenienie systemów żywnościowych^{8 9 10}.

⁵ European Commission. A Farm to Fork Strategy for a fair, healthy and environmentally friendly food system. COM(2020) 381 final, Brussels, 20.05.2020, 2020.

⁶ <https://www.ecocert.com/en/certification-detail/Sustainable-agriculture-fsa>, dostęp w dniu 30.04.2026

⁷ SAI Platform. FSA 3.0 Self-Assessment Questionnaire. Resource Centre. <https://saipatform.org/resource-centre/fsa/>, dostęp w dniu 30.04.2026

⁸ Jarzębowski, S., Bourlakis, M., Bezat-Jarzębowska, A. Short Food Supply Chains (SFSC) as Local and Sustainable Systems. *Sustainability*, 12(11), 4715. <https://doi.org/10.3390/su12114715>.

⁹ Raftowicz, M., Solarz, K., Dradrach, A. Short food supply chains as a practical implication of sustainable development ideas. *Sustainability*, 16(7), 2910, <https://doi.org/10.3390/su16072910>.

¹⁰ Herzig, J., Zander, K. Determinants of consumer behavior in short food supply chains: a systematic literature review. *Agricultural and Food Economics*, 13(1), 21, <https://doi.org/10.1186/s40100-025-00370-w>

Celem pracy jest analiza organizacyjno-metodycznych uwarunkowań utworzenia i zarządzania grupą FMG w łańcuchu dostaw jabłek oraz ocena, w jaki sposób system grupowy wspiera wdrażanie standardu FSA, identyfikowalność surowca i doskonalenie praktyk zrównoważonego rolnictwa w gospodarstwach sadowniczych.

Material i metody

Materiał badań stanowi dokumentacja wewnętrzna dotycząca powołania i zarządzania grupą FMG Dreher, obejmująca opis struktury dostawców, procedury jakościowe, zasady uczestnictwa gospodarstw w grupie, wymagania standardu FSA, listę dokumentów FMGD, zasady audytowania oraz wyniki ocen wewnętrznych. Dane liczbowe odnoszą się głównie do lat 2020, 2021 i 2024, a informacje o ocenie gospodarstw dotyczą próby 29 gospodarstw wylosowanych z grupy liczącej pierwotnie 107 członków.

Zastosowano metodę studium przypadku, analizę dokumentów wewnętrznych oraz statystykę opisową. Dane jakościowe uporządkowano w kategorie: cele systemu, struktura dostawców, zasady członkostwa, komponenty systemu zarządzania, procedury audytowe, działania korygujące oraz wyniki ocen. Dane ilościowe przedstawiono w tabelach i na rycinach, wykorzystując miary udziału procentowego oraz liczebności gospodarstw.

Analizę przeprowadzono z perspektywy koordynatora grupy FMG, czyli podmiotu odpowiedzialnego za kontakt z gospodarstwami, prowadzenie systemu bilansu masy, dokumentowanie zmian członkostwa, wspieranie rozwoju gospodarstw oraz przygotowanie do weryfikacji zewnętrznej (tab. 1). W interpretacji wyników uwzględniono wymiar środowiskowy, społeczny i ekonomiczny rolnictwa zrównoważonego.

Tabela 1. Charakterystyka materiału i metodyki badania

Element metodyki	Zakres w badaniu
Typ badania	Studium przypadku systemu zarządzania grupą FMG w łańcuchu dostaw jabłek.
Jednostka analizy	Grupa gospodarstw sadowniczych dostarczających jabłka do punktów skupu współpracujących z Dreher Poland Sp. z o.o. lub bezpośrednio do zakładu.
Materiał źródłowy	Dokumentacja wewnętrzna FMG Dreher: opis systemu, struktura dostawców, formularze FMGD, procedury audytowe i wyniki ocen wewnętrznych.
Zakres czasowy danych	Struktura zakupów: 2020, 2021, 2024; struktura grupy i audyty: dokumentacja wdrożeniowa FMG.
Metody analizy	Analiza dokumentów, porządkowanie kategorialne, statystyka opisowa, interpretacja w odniesieniu do literatury i standardu FSA.

Kontekst standardu FSA i założenia grupy FMG

Rolnictwo zrównoważone jako rama oceny

W analizowanym systemie rolnictwo zrównoważone rozumiane jest jako efektywna produkcja bezpiecznej żywności wysokiej jakości przy jednoczesnej ochronie środowiska naturalnego, zapewnieniu ekonomicznej trwałości gospodarstw przy uwzględnieniu uwarunkowań społecznych. Takie ujęcie jest zgodne z klasyczną strukturą trzech filarów zrównoważenia: środowiskowego, społecznego i ekonomicznego (tab. 2).

Tabela 2. Trzy filary rolnictwa zrównoważonego w systemie FMG

Filar środowiskowy	Filar społeczny	Filar ekonomiczny
Dobór roślin, prawidłowe sadzenie i pielęgnacja sadów.	Dbałość o prawa i bezpieczeństwo pracowników.	Stabilność finansowa gospodarstwa.
Wspieranie bioróżnorodności i żyzności gleby.	Spółeczna akceptacja produkcji rolnej i dbałość o społeczność lokalną.	Przestrzeganie przepisów prawa i uczciwych zasad współpracy.
Racjonalne nawożenie oraz integrowana ochrona roślin.	Współpraca z doradcami i samokształcenie producentów.	Dokumentowanie plonów, zabiegów, kosztów, przychodów i rentowności.
Efektywne wykorzystanie wody, ograniczanie emisji i właściwe zarządzanie odpadami.	Bezpieczeństwo pracy, procedury awaryjne i szkolenia.	Dostosowanie produkcji do wymogów rynku i oczekiwań odbiorców.

Standard Farm Sustainability Assessment

Farm Sustainability Assessment jest narzędziem opracowanym przez Sustainable Agriculture Initiative Platform w celu ujednolicenia oceny poziomu zrównoważenia gospodarstw i wsparcia ciągłego doskonalenia w łańcuchach dostaw żywności. W praktyce FSA opiera się na samoocenie gospodarstwa przy użyciu kwestionariusza SAQ, na analizie braków, przygotowaniu planu działań oraz (w przypadku deklaracji poziomu FSA) weryfikacji przez niezależną jednostkę. Standard nie jest klasyczną certyfikacją konsumencką; pełni przede wszystkim funkcję narzędzia business-to-business, wspierającego wiarygodność deklaracji w łańcuchu dostaw.

W analizowanym wdrożeniu stosowano opcję bezpośredniej samooceny i weryfikacji. Oznacza to, że rolnicy odpowiadali na pytania kwestionariusza, a następnie wybrane gospodarstwa podlegały audytom wewnętrznym oraz zewnętrznej weryfikacji. Pytania FSA podzielono na zagadnienia kluczowe, podstawowe i zaawansowane. Odpowiedzi interpretowano procentowo, a wynik końcowy przypisywano do poziomów brązowego, srebrnego lub złotego (tab. 3).

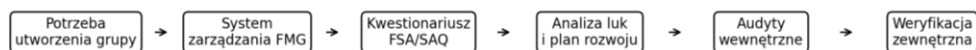
Tabela 3. Progi poziomów FSA przyjęte w analizowanej dokumentacji

Poziom FSA w badanym wdrożeniu	Zagadnienia kluczowe	Zagadnienia podstawowe	Zagadnienia zaawansowane
Brązowy	100% odpowiedzi twierdzących	minimum 75% odpowiedzi twierdzących	brak minimalnego progu
Srebrny	100% odpowiedzi twierdzących	minimum 80% odpowiedzi twierdzących	minimum 50% odpowiedzi twierdzących
Złoty	100% odpowiedzi twierdzących	100% odpowiedzi twierdzących	minimum 75% odpowiedzi twierdzących

Farm Management Group jako rozwiązanie organizacyjne

Farm Management Group jest grupą gospodarstw, które wdrażają FSA wspólnie, zazwyczaj przy udziale nabywcy surowca. Z punktu widzenia rozdrobnionej bazy sadowników model grupowy jest rozwiązaniem pragmatycznym, ponieważ ogranicza konieczność prowadzenia pełnej, indywidualnej ścieżki wdrożenia w każdym gospodarstwie. Kluczowe znaczenie ma jednak spójność grupy, wspólny system zarządzania, identyfikowalność gospodarstw, dobrowolność uczestnictwa oraz gotowość do wprowadzania działań korygujących.

W przypadku FMG Dreher wspólnym mianownikiem członków jest produkcja i dostarczanie tego samego surowca, czyli jabłek. Rolnicy prowadzą gospodarstwa w Polsce, podpisują oświadczenie przystąpienia do grupy, korzystają z tej samej opcji wdrożenia FSA oraz pozostają w systemie zarządzania koordynowanym przez Dreher Poland Sp. z o.o. Liczebność grupy może zmieniać się w kolejnych latach, jednak zmiany powinny mieścić się w dopuszczalnych granicach określonych w wytycznych wdrożeniowych.



Rysunek 1. Sekwencja wdrażania standardu FSA w grupie FMG

Charakterystyka łańcucha dostaw surowca

Struktura dostaw i pochodzenie jabłek

Zakład przetwórstwa owoców objęty analizą funkcjonuje w systemie dostaw mieszanych, w którym surowiec pochodzi z gospodarstw lokalnych, z regionów oddalonych o około 80 km oraz z obszarów oddalonych o około 200 km. W 2020 r. 52% zakupionego surowca pochodziło z lokalnych gospodarstw, około 40% z regionu oddalonego o około 200 km, a pozostałe 8% z okolic oddalonych o około 80 km. Taki układ wskazuje na

znaczenie lokalnego zaplecza sadowniczego, ale jednocześnie pokazuje, że zapewnienie ciągłości produkcji wymaga współpracy z szerszą siecią dostawców.

Pod względem typów dostawców w 2020 r. dominowały punkty skupu, które odpowiadały za około 89% dostaw (tab. 4). Grupy producenckie miały około 10% udziału, a dostawy bezpośrednie od rolników stanowiły około 1%. W kolejnych latach nastąpił wzrost znaczenia dostaw bezpośrednich. W 2021 r. ich udział wzrósł do około 5%, a w 2024 r. do około 8%, przy liczbie około 55 okolicznych gospodarstw dostarczających owoce bezpośrednio do zakładu. Zmiana ta skraca łańcuch dostaw i wzmacnia bezpośrednie relacje pomiędzy przetwórstwem a producentami.

Tabela 4. Zmiany w strukturze źródeł dostaw surowca

Rok	Punkty skupu	Grupy producenckie	Dostawy bezpośrednie od rolników	Komentarz interpretacyjny
2020	ok. 89%	ok. 10%	ok. 1%	Dominacja punktów skupu; dostawy bezpośrednie marginalne.
2021	ok. 85%	ok. 10%	ok. 5%	Wzrost liczby okolicznych rolników współpracujących bezpośrednio z zakładem.
2024	ok. 82%	ok. 10%	ok. 8%	Okolo 55 gospodarstw z bezpośredniej okolicy zakładu; wzrost o ok. 3 p.p. wobec 2021 r.

Kontrola jakości i identyfikowalność surowca

Rozładunek jabłek do silosów odbywa się pod nadzorem odpowiedzialnego pracownika, a jakość owoców jest oceniana na bieżąco. Wynik kontroli jest ujmowany na protokole kontroli dostawy towaru (tab. 5). Do podstawowych wymagań jakościowych należą:

- brak zanieczyszczeń i ciał obcych, brak obcych zapachów,
- brak pomieszania z innymi gatunkami owoców,
- zgodność deklarowanego pochodzenia,
- brak szkodników i zwierząt,
- ograniczony udział owoców zepsutych lub porażonych pleśnią.

Każdy dostawca zobowiązany jest do zapoznania się z wewnętrznymi wytycznymi jakościowymi. Dokumenty te są aktualizowane w razie potrzeby oraz przechowywane w wersji papierowej i elektronicznej. Z punktu widzenia FSA szczególne znaczenie ma także system bilansu masy, czyli monitorowanie przepływu surowca w taki sposób, aby cecha zrównoważonego pochodzenia mogła zostać przypisana do odpowiednich partii lub wolumenów. W analizowanym systemie dane dotyczące ilości, pochodzenia i czasu dostawy są rejestrowane w programie SAP, natomiast dokumentacja jakościowa jest utrzymywana w systemie Safefood 360.

Tabela 5. Główne elementy kontroli surowca w łańcuchu dostaw jabłek

Obszar kontroli	Wymaganie operacyjne	Znaczenie dla FSA
Jakość fizyczna owoców	Brak ziemi, liści, drewna, metalu, plastiku, papieru i innych ciał obcych.	Ograniczenie ryzyka jakościowego i bezpieczeństwa żywności.
Pochodzenie surowca	Brak mieszania owoców z różnych deklarowanych źródeł pochodzenia.	Podstawa identyfikowalności i bilansu masy.
Stan biologiczny surowca	Brak czerwii, much, gąsienic i innych zwierząt; ograniczenie owoców zepsutych i spleśniałych.	Ochrona jakości partii oraz zgodności z wymaganiami odbiorcy.
Dokumentacja dostawy	Protokół kontroli dostawy, dane w SAP, aktualne specyfikacje.	Możliwość audytu, śledzenia partii i rozliczenia wolumenów FSA.

Model utworzenia i zarządzania FMG Dreher

Struktura grupy

FMG Dreher została powołana jako dobrowolna grupa sadowników, których produkcja jest powiązana z dostawami jabłek do zakładu przetwórstwa owoców. W pierwotnej strukturze grupa liczyła 107 członków (tab. 6). Trzy gospodarstwa były bezpośrednimi dostawcami zakładu, natomiast 104 gospodarstwa dostarczały jabłka do dziewięciu punktów skupu współpracujących z zakładem. Łączna powierzchnia sadów jabłoniowych należących do członków grupy wynosiła około 1000 ha.

Tabela 6. Podstawowe parametry struktury FMG Dreher

Element struktury FMG	Wartość lub opis
Liczba członków pierwotnej grupy	107 gospodarstw sadowniczych
Dostawcy bezpośredni	3 gospodarstwa
Dostawcy przez punkty skupu	104 gospodarstwa
Liczba punktów skupu w strukturze FMG	9 punktów skupu
Łączna powierzchnia sadów jabłoniowych	około 1000 ha
Wspólny produkt	jabłka przeznaczone do przetwórstwa
Kraj prowadzenia produkcji	Polska

Taki model wskazuje na ważną cechę organizacyjną grupy: nie wszyscy producenci mają bezpośrednią relację biznesową z przetwórcą. Właściciele i zarządzający punktami skupu pełnią rolę pośredników organizacyjnych, którzy umożliwiają kontakt koordyna-

tora z gospodarstwami, wspierają przekazywanie informacji i ułatwiają organizację spotkań (tab. 7). W praktyce oznacza to, że skuteczność FMG zależy nie tylko od formalnych procedur, lecz także od jakości relacji pomiędzy zakładem, punktami skupu i sadownikami.

Tabela 7. Punkty skupu współpracujące przy tworzeniu FMG Dreher

Punkt skupu lub podmiot współpracujący	Lokalizacja
P.P.H.U. „Agro-San” S.C. „Skup i Sprzedaż Owoców i Warzyw”	Gałkowitz - Ocina
Gold Fruit	Koprzywnica
Skup i sprzedaż owoców i warzyw Marta Pawłoga	Świątniki
Handel - Usługi Pietruszka Marian	Komorna
Skup owoców i warzyw Monika Pawlica	Daromin
Firma Handlowo - Usługowa „KRAKPOL” Waldemar Krakowiak	Głazów
Firma Handlowo - Usługowa „Robex” spółka jawna	Złota
MAG-GAR Magdalena Gara, Sprzedaż Hurtowa Owoców i Warzyw	Malice
Firma Handlowo - Usługowa TOM-AG Agnieszka Gara	Ocin

Proces rekrutacji i komunikacji z gospodarstwami

Przystąpienie do grupy miało charakter dobrowolny. Rolnicy podpisali oświadczenie członkostwa w FMG oraz klauzulę dotyczącą przetwarzania danych osobowych. W przypadku dostawców bezpośrednich spotkania odbywały się z przedstawicielem koordynatora. W przypadku gospodarstw dostarczających owoce do punktów skupu pierwsze spotkania organizowano w obecności właściciela lub zarządzającego punktem skupu. Podczas spotkań przedstawiano cel utworzenia grupy, wymagania wobec producentów oraz możliwości korzystania z materiałów edukacyjnych z zakresu zrównoważonego rolnictwa.

W trakcie pierwszego kontaktu przeprowadzano krótką ankietę odnoszącą się do głównych obszarów kwestionariusza FSA:

- stosowania środków ochrony roślin,
- nawożenia,
- nawadniania,
- zgodności z prawem,
- zarządzania glebą,
- stabilności finansowej,
- zatrudniania pracowników.

Rolnicy dobrowolnie udostępniali dane kontaktowe, co umożliwiło dalszą komunikację telefoniczną, osobiste spotkania po wcześniejszym uzgodnieniu oraz korespondencję przez listę mailingową.

System zarządzania grupą

System zarządzania FMG Dreher obejmuje sześć powiązanych komponentów. Pierwszym z nich jest identyfikacja wszystkich członków grupy wraz ze zmianami w ich liczbie. Drugim jest system liczenia surowca, oparty na bilansie masy i danych z programu SAP. Trzecim elementem jest dokumentacja jakościowa i operacyjna, przechowywana w systemie Safefood 360 oraz w dokumentacji papierowej. Czwarty komponent stanowią rejestry produkcyjne prowadzone przez gospodarstwa i koordynatora. Piąty obszar obejmuje ochronę danych osobowych i formalne zgody rolników. Ostatnim elementem jest plan ciągłego rozwoju wynikający z analizy kwestionariuszy i audytów (tab. 8).

Tabela 8. Komponenty systemu zarządzania FMG Dreher

Komponent systemu	Zakres odpowiedzialności koordynatora	Znaczenie dla skuteczności FMG
Identyfikacja gospodarstw	Prowadzenie listy członków, dokumentowanie zmian, utrzymywanie danych kontaktowych.	Zapewnia spójność grupy i możliwość komunikacji.
Bilans masy	Liczenie ilości surowca spełniającego wymagania FSA, monitorowanie dostaw w SAP.	Umożliwia rozliczenie wolumenów oraz identyfikowalność.
Dokumentacja jakościowa	Aktualizacja i bezpieczne przechowywanie procedur oraz specyfikacji.	Tworzy podstawę audytu i zgodności z wymaganiami odbiorców.
Rejestry produkcyjne	Utrwalanie danych dotyczących zabiegów, plonów, nawozów, ŚOR i materiału roślinnego.	Pozwala weryfikować praktyki gospodarstw i planować działania korygujące.
Ochrona danych osobowych	Pozyskanie i przechowywanie zgód zgodnie z RODO.	Warunkuje legalny kontakt z członkami grupy.
Plan ciągłego rozwoju	Identyfikacja luk, ustalanie priorytetów i organizacja szkoleń.	Przekształca ocenę FSA w proces doskonalenia, a nie jednorazową kontrolę.

Dokumentacja FMGD jako narzędzie standaryzacji praktyk

Na potrzeby zarządzania grupą przygotowano zestaw dokumentów wewnętrznych oznaczonych symbolem FMGD. Dokumenty te nie stanowią części głównego systemu zarządzania jakością zakładu, lecz są narzędziem komunikacji wymagań FSA i dobrych praktyk na poziomie gospodarstwa. Obejmują rejestry produkcyjne, oświadczenia, oceny ryzyka, procedury postępowania w sytuacjach awaryjnych oraz wzory dokumentów związanych z pracą sezonową.

Systematyczna aktualizacja dokumentów ma znaczenie dla spójności grupy. Każda zmiana wersji wymaga przekazania jej członkom FMG, a w użyciu powinny pozostawać wyłącznie dokumenty aktualne. Dokumentacja FMGD może być interpretowana jako instrument instytucjonalizacji wiedzy: przekształca ogólne wymagania standardu FSA w konkretne, lokalne procedury możliwe do zastosowania w gospodarstwach sadowniczych (tab. 9).

Tabela 9. Funkcjonalne grupy dokumentów FMGD

Grupa dokumentów	Przykładowe dokumenty FMGD	Funkcja w systemie
Rejestry produkcyjne	FMGD-001 Rejestr zbioru plonu; FMGD-002 Rejestr ŚOR; FMGD-003 Rejestr nawozów; FMGD-004 Rejestr materiału roślinnego; FMGD-017 Rejestr zużycia wody do nawadniania.	Umożliwiają wykazanie historii produkcji i zgodności zabiegów.
Gospodarka magazynowa i nawożenie	FMGD-005 Tabela kalibracji opryskiwacza; FMGD-006 Stan magazynowy ŚOR; FMGD-007 Stan magazynowy nawozy; FMGD-014 Bilans nawozowy.	Wspierają racjonalne i bezpieczne stosowanie środków produkcji.
Ocena ryzyka i planowanie	FMGD-008 Ocena ryzyka dla pól; FMGD-020 Plan zarządzania gospodarstwem; FMGD-023 Ocena ryzyka gospodarstwa; FMGD-024 Ocena bioróżnorodności; FMGD-025 Ocena ryzyka procesu produkcji.	Przekładają wymagania FSA na zarządzanie prewencyjne.
Oświadczenia zgodności	FMGD-009 Osady ściekowe; FMGD-010 Gatunki inwazyjne i GMO; FMGD-011 Pracownicy; FMGD-012 Przepisy prawa; FMGD-013 Dzierżawa; FMGD-015 Strefy chronione.	Potwierdzają kluczowe deklaracje wymagane w procesie oceny.
Członkostwo, dane osobowe i procedury	FMGD-018 Oświadczenie przystąpienia do grupy; FMGD-019 Zgoda na przetwarzanie danych osobowych; FMGD-021 Oświadczenie zapoznania się z procedurami; FMGD-022 Postępowanie w sytuacjach awaryjnych; FMGD-026 Umowa o pomoc przy zbiorach.	Regulują relację organizacyjną pomiędzy rolnikiem, grupą i koordynatorem.

Audyty wewnętrzne, weryfikacja zewnętrzna i działania korygujące

Zgodnie z FSA samoocena gospodarstw powinna zostać uzupełniona kontrolą próby gospodarstw oraz weryfikacją systemu zarządzania. Zgodnie z wytycznymi FSA dla grupy liczącej od 101 do 200 gospodarstw audyty należy przeprowadzić u 29 plantatorów. W badanym przypadku, zgodnie z liczebnością grupy, do oceny wewnętrznej wylosowano 29 gospodarstw. Terminy audytów uzgadniano z właścicielami, a oceny prowadził przedstawiciel koordynatora. Zewnętrzna weryfikacja powinna być przeprowadzona przez zatwierdzoną, niezależną jednostkę i obejmować zarówno system zarządzania FMG, jak i próbę gospodarstw.

Ocena wewnętrzna wykazała, że 16 spośród 29 ocenianych gospodarstw, czyli 55%, osiągnęło poziom brązowy, a 13 gospodarstw, czyli 45%, poziom srebrny. Żadne gospodarstwo nie osiągnęło poziomu złotego. Wynik interpretowano jako warunkowy, wymagający wdrożenia wskazanych działań korygujących. Analiza wyników audytów wykazała, że priorytetowymi działaniami pozwalającymi na poprawę poziomu są:

- szkolenia z zakresu stosowania środków ochrony roślin,
- udzielania pierwszej pomocy przedmedycznej,
- bezpieczeństwa pracy i ergonomii w rolnictwie,
- archiwizacja dokumentów,

– zasady zatrudniania pracowników (tab. 10).

Tabela 10. Główne działania korygujące po ocenach wewnętrznych

Obszar działań korygujących	Uzasadnienie	Oczekiwany efekt
Szkolenie z zakresu ŚOR	Potrzeba bezpiecznego i zgodnego z prawem stosowania środków ochrony roślin.	Ograniczenie ryzyka dla środowiska, pracowników i jakości surowca.
Pierwsza pomoc przedmedyczna	W gospodarstwach występują ryzyka urazów podczas prac sadowniczych i zbiorów.	Wzrost bezpieczeństwa pracy i gotowości reagowania.
Bezpieczeństwo pracy i ergonomia	Prace sadownicze obejmują czynności fizyczne, obsługę maszyn i pracę sezonową.	Poprawa warunków pracy oraz zgodności z filarem społecznym FSA.
Archiwizacja dokumentów	Konieczność przechowywania dokumentów ŚOR, nawozów i materiału szkółkarskiego co najmniej 5 lat.	Większa audytowalność i wiarygodność deklaracji gospodarstwa.
Zasady zatrudniania pracowników	Potrzeba formalizacji pracy sezonowej i respektowania przepisów prawa.	Zmniejszenie ryzyk społecznych i prawnych w gospodarstwie.

Podsumowanie

Przedstawione studium przypadku pokazuje, że wdrażanie FSA w sektorze sadowniczym ma nie tylko wymiar techniczny, lecz przede wszystkim organizacyjny. Kwestionariusz samooceny jest punktem wyjścia, ale o skuteczności systemu decyduje zdolność koordynatora do utrzymania kontaktu z rolnikami, ujednolicania dokumentacji, prowadzenia bilansu masy, organizowania szkoleń i przekładania wyników audytów na działania doskonalące. Jest to zgodne z ujęciem rolnictwa zrównoważonego jako procesu wzmacniania kapitałów gospodarstwa i jego otoczenia, a nie wyłącznie jako zestawu pojedynczych praktyk środowiskowych.

Znaczącą korzyścią modelu FMG jest możliwość objęcia systemem FSA rozproszonej bazy dostawców. W analizowanym przypadku większość członków grupy nie była bezpośrednimi dostawcami zakładu, lecz współpracowała z punktami skupu. Gdyby każde gospodarstwo miało być wprowadzane do systemu oddzielnie, koszty organizacyjne i audytowe mogłyby być nieproporcjonalnie wysokie. Grupowy model wdrożenia pozwala wykorzystać losową próbę audytów, wspólne procedury i koordynowany plan rozwoju, dzięki czemu standard staje się możliwy do zastosowania także w łańcuchach opartych na wielu małych i średnich gospodarstwach.

Analiza struktury dostaw wskazuje jednocześnie na powolne skracanie łańcucha dostaw poprzez wzrost udziału dostaw bezpośrednich. Udział ten wzrósł z około 1% w 2020 r. do około 5% w 2021 r. i około 8% w 2024 r. Może to sprzyjać lepszej identyfikowalności surowca, bardziej bezpośredniej komunikacji z producentem i większemu wpływowi przetwórcy na praktyki produkcyjne. Nie oznacza to jednak automatycznej eliminacji roli punktów skupu, które nadal pozostają kluczowe dla dostępności wolumenów i organizacji dostaw.

Wyniki ocen wewnętrznych wskazują, że badana grupa nie była jednorodna pod względem poziomu wdrożenia wymagań FSA. Osiągnięcie poziomu brązowego przez 55% gospodarstw i srebrnego przez 45% gospodarstw można uznać za wynik pozytywny, zwłaszcza w kontekście początkowego etapu formalizacji systemu. Jednocześnie warunkowy charakter tego wyniku, uzależniony od wykonania działań korygujących, pokazuje, że sama deklaracja uczestnictwa w grupie nie jest wystarczająca. Konieczne jest utrzymanie cyklu: ocena - analiza luk - szkolenie - poprawa dokumentacji - ponowna ocena.

Najważniejszym obszarem ryzyka jest dokumentacja. Gospodarstwa mogą wykonywać część praktyk zgodnie z wymaganiami, ale brak zapisów dotyczących środków ochrony roślin, nawożenia, materiału szkółkarskiego, zużycia wody czy zatrudnienia pracowników ogranicza możliwość potwierdzenia zgodności podczas audytu. W tym sensie FSA pełni funkcję narzędzia formalizującego praktyki, które w gospodarstwach rodzinnych mogły wcześniej funkcjonować w sposób nieudokumentowany lub rozproszony.

Ograniczeniem badania jest jego oparcie na jednym przypadku oraz na dokumentacji wewnętrznej. Dane nie pozwalają na ilościową ocenę wpływu wdrożenia FSA na emisję gazów cieplarnianych, zużycie wody, rentowność gospodarstw ani bioróżnorodność. Nie analizowano również kosztów wdrożenia i utrzymania systemu po stronie koordynatora, punktów skupu i rolników. Dlatego wyniki należy traktować jako opis modelu organizacyjnego oraz jego potencjału zarządczego, a nie jako pełną ocenę efektów środowiskowych lub ekonomicznych.

Bibliografia

- FAO. Building a common vision for sustainable food and agriculture: Principles and approaches. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2014.
- United Nations. Transforming our world: the 2030 Agenda for Sustainable Development. A/RES/70/1. New York: United Nations, 2015.
- Pretty, J. Agricultural sustainability: concepts, principles and evidence. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 363(1491), 447-465. <https://doi.org/10.1098/rstb.2007.2163>.
- Tilman, D., Cassman, K. G., Matson, P. A., Naylor, R., & Polasky, S. Agricultural sustainability and intensive production practices. *Nature*, 418, 671-677. <https://doi.org/10.1038/nature01014>.
- European Commission. A Farm to Fork Strategy for a fair, healthy and environmentally-friendly food system. COM(2020) 381 final, Brussels, 20.05.2020, 2020. <https://www.ecocert.com/en/certification-detail/Sustainable-agriculture-fsa>, dostęp w dniu 30.04.2026
- SAI Platform. FSA 3.0 Self-Assessment Questionnaire. Resource Centre. <https://saipatform.org/resource-centre/fsa/>, dostęp w dniu 30.04.2026
- Jarzębowski, S., Bourlakis, M., Bezat-Jarzębowska, A. Short Food Supply Chains (SFSC) as Local and Sustainable Systems. *Sustainability*, 12(11), 4715. <https://doi.org/10.3390/su12114715>.

Raftowicz, M., Solarz, K., Dradrach, A. Short food supply chains as a practical implication of sustainable development ideas. *Sustainability*, 16(7), 2910, <https://doi.org/10.3390/su16072910>.

Herzig, J., Zander, K. Determinants of consumer behavior in short food supply chains: a systematic literature review. *Agricultural and Food Economics*, 13(1), 21, <https://doi.org/10.1186/s40100-025-00370-w>

Adres do korespondencji: anna.krawczuk@up.edu.pl

ORCID: Anna Krawczuk 0000-0001-6227-7740

ORCID: Sławomir Kocira 0000-0002-2888-3023

TRANSFORMACJA SEKTORA ODNAWIALNYCH ŹRÓDEŁ ENERGII W POLSCE W LATACH 2015–2025: KIERUNKI, OGRANICZENIA I PROGNOZY ROZWOJU

Aneta Saletnik¹, Czesław Puchalski¹, Bogdan Saletnik¹

¹ Katedra Bioenergetyki, Analizy Żywności i Mikrobiologii, Instytut Technologii Żywności i Żywnienia, Wydział Technologiczno-Przyrodniczy, Uniwersytet Rzeszowski, ul. Ćwiklińskiej 2D, 35-601 Rzeszów

Wprowadzenie

Rozwój energetyki odnawialnej (OZE) w Polsce stanowi istotny element transformacji energetycznej kraju, wynikający zarówno z zobowiązań klimatycznych Unii Europejskiej, potrzeby dywersyfikacji źródeł energii oraz kształtowania bezpieczeństwa energetycznego. Celem pracy jest syntetyczna analiza dynamiki zmian sektora odnawialnych źródeł energii w ostatniej dekadzie, uwzględniająca rozwiązania technologiczne, bariery rozwoju oraz perspektyw na najbliższe lata.

Dyrektywa Parlamentu Europejskiego i Rady (UE) 2023/2413 z dnia 18 października 2023 r. w odniesieniu do promowania energii ze źródeł odnawialnych ustanowiła nowe cele dla Unii Europejskiej na rok 2030, a także zmodyfikowała zasady obliczania udziałów energii ze źródeł odnawialnych w końcowym zużyciu brutto, począwszy od 2021 r.^{1,2} W Unii Europejskiej energię elektryczną pozyskuje się głównie z odnawialnych źródeł energii (43%), energii jądrowej (23%), paliw gazowych (17%) oraz paliw stałych (12%). Stopień wykorzystania tych źródeł w poszczególnych krajach jest różny³. Polska obecnie jest jedynym krajem należącym do UE, w którym dominującym źródłem energii wciąż są stałe paliwa kopalne (węgiel kamienny i węgiel brunatny). Udział węgla kamiennego i brunatnego w całkowitej produkcji prądu w Polsce w ciągu ostatniej dekady uległ znacznemu obniżeniu. Zmniejszył się z 80% w 2015 r. do 60% w 2023 r., w 2025 roku udział energii z węgla wyniósł 52,6%².

30 grudnia 2019 r. Polska przekazała do Komisji Europejskiej „Krajowy plan na rzecz energii i klimatu na lata 2021–2030”. Obejmuje on, m.in. cele dot. wskaźników wykorzystania odnawialnych źródeł energii: osiągnięcie 21% udziału OZE w końcowym zużyciu energii brutto oraz osiągnięcie 14% udziału energii odnawialnej

¹ Dyrektywa Parlamentu Europejskiego i Rady (UE) 2023/2413 z dnia 18 października 2023 r. zmieniająca dyrektywę (UE) 2018/2001, rozporządzenie (UE) 2018/1999 i dyrektywę 98/70/WE w odniesieniu do promowania energii ze źródeł odnawialnych oraz uchylająca dyrektywę Rady (UE) 2015/652

² Główny Urząd Statystyczny, 2026, Polska na drodze zrównoważonego rozwoju, Raport SDG 2025. Pozyskano z <https://raportsdg.stat.gov.pl/cel7.html>

³ IRENA, 2025, Renewable capacity statistics 2025, International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi

w końcowym zużyciu energii w transporcie. Cel dla rocznego wzrostu udziału OZE w ciepłownictwie i chłodnictwie powinien utrzymać się na poziomie 1,1 p.proc. średniorocznie⁴.

Analiza danych statystycznych wykorzystania OZE wskazuje, że całkowita moc zainstalowana w OZE w Polsce wzrosła z około 7 GW w 2015 r. do ponad 30 GW w 2025r⁵.

Dzięki szybkiemu rozwojowi udział odnawialnych form energii w krajowym miksie elektroenergetycznym osiągnął poziom 31,4% w 2025 roku, a w czerwcu 2025 roku produkcja z OZE okresowo przewyższyła udział węgla, odnotowując historyczny wynik około 45,6 % w całkowitej produkcji energii.

W 2025 roku po raz pierwszy w historii łączny udział węgla kamiennego i brunatnego w produkcji energii elektrycznej spadł poniżej 50% i utrzymywał się na tym poziomie przez okres 5 miesięcy.

Analiza struktury produkcji energii elektrycznej z OZE wskazuje, że w 2025 r. wiodącym odnawialnym źródłem energii były farmy wiatrowe, odpowiadające za 13,8% całkowitej produkcji energii^{6,7}. Jednakże, pomimo dynamicznego rozwoju technologii sektora OZE na przestrzeni ostatnich lat, należy pamiętać, że nadal ponad połowa wytwarzanej energii elektrycznej pochodzi z węgla, co wskazuje na wciąż wysoką zależność kraju od paliw kopalnych⁸.

Kluczowe kierunki rozwoju sektora odnawialnych źródeł energii w Polsce koncentrują się obecnie przede wszystkim na intensyfikacji inwestycji w morską energetykę wiatrową (offshore), która w perspektywie najbliższych dekad może istotnie zwiększyć udział energii wiatrowej w krajowym miksie energetycznym. Równolegle dynamicznie rozwija się sektor energetyki słonecznej, obejmujący zarówno instalacje prosumenckie, jak i wielkoskalowe farmy fotowoltaiczne⁹.

Pomimo rosnącego znaczenia technologii przyjaznych środowisku, ich szersze wdrażanie w Polsce napotyka nadal liczne ograniczenia. Do najważniejszych należą złożone i często zmieniające się regulacje prawne, bariery lokalizacyjne, niewystarczająco rozwinięta infrastruktura sieciowa oraz ograniczona przepustowość systemu przesyłowego. Istotnym wyzwaniem pozostaje także niestabilność otoczenia regulacyjnego, która wpływa na poziom ryzyka inwestycyjnego i tempo realizacji nowych projektów. Jednak połączenie dużego już doświadczenia inwestorów, wsparcia polityki państwowej

⁴ EUROPEAN COMMISSION EUROSTAT Directorate E: Sectoral and regional statistics Unit E.5: Energy. SHARES Tool Manual Version 2024.120925 Pozyskano z: [https://ec.europa.eu/eurostat/web/energy/database/additional-data#Short%20assessment%20of%20renewable%20energy%20sources%20\(SHARES\)](https://ec.europa.eu/eurostat/web/energy/database/additional-data#Short%20assessment%20of%20renewable%20energy%20sources%20(SHARES))

⁵ Kwidziński K., Dusiło M. Transformacja energetyczna w Polsce, Edycja 2025, Forum Energii, 2025. Pozyskano z <https://www.forum-energii.eu/transformacja-energetyczna-polski-edycja-2025>

⁶ Forum Energii (on-line) Pozyskano z https://www.forum-energii.eu/2025_wrapped

⁷ Miesięczniki Forum Energii (on-line): Pozyskano z <https://www.forum-energii.eu/miesiecznik>

⁸ EUROPEAN COMMISSION EUROSTAT..... „op.cit”

⁹ Krajowy Plan w dziedzinie Energii i Klimatu do 2030 r. (aktualizacja KPEiK z 2019 r.) Warszawa, 2024.

oraz postępu technologicznego sprzyja wzmocnieniu roli odnawialnych źródeł energii w krajowym systemie elektroenergetycznym¹⁰.

Analiza literatury wskazuje na konieczność prowadzenia długofalowej strategii polityki energetycznej oraz kontynuowania badań nad rozwiązaniami systemowymi przy jednoczesnym rozwoju infrastruktury technicznej i przesyłowej dostosowanej do rosnącego udziału odnawialnych źródeł energii¹¹.

Tabela 1. Porównanie procentowe struktury produkcji energii elektrycznej wg nośników energii w 2023 r. w Polsce i Unii Europejskiej

RODZAJ PALIWA	PL	UE
STAŁE PALIWA KOPALNE	59,06 %	11,61 %
OZE	26,61 %	43,20 %
PALIWA GAZOWE	9,86 %	16,68 %
POZOSTAŁE PALIWA	1,69 %	1,86 %
OLEJE	1,20 %	1,83 %
PALIWA Z WODY PRZEPOMPOWANEJ	0,79 %	1,13 %
JĄDROWA ENERGIA CIEPLNA	0,00 %	22,54 %

Źródło: opracowanie własne na podstawie GUS¹²

Kierunek transformacji produkcji energii ze źródeł odnawialnych w latach 2015–2025

W Polsce od roku 2015 do roku 2023 odnotowano dwukrotny wzrost produkcji energii ze źródeł odnawialnych (z 13% do 27%). Kluczową rolę w tym procesie odegrał dynamiczny rozwój energetyki słonecznej, której udział wzrósł z marginalnego poziomu 0,03% do 7%, oraz energetyki wiatrowej, gdzie odnotowano wzrost z 7% do 14%. Równocześnie zwiększał się udział energii ze źródeł odnawialnych w pozyskaniu energii pierwotnej ogółem – w latach 2020–2024 wzrósł on z 21,2% do 27,2%, co potwierdza postępujący proces transformacji krajowego sektora energetycznego w kierunku bardziej zrównoważonego modelu^{13,14}. Metody pozyskiwania energii ze źródeł odnawialnych w Polsce są w dużej mierze determinowane przez uwarunkowania geograficzne oraz dostępność krajowych zasobów możliwych do efektywnego zagospodarowa-

¹⁰ Krajowy Plan w dziedzinie Energii i Klimatu do 2030 r., op.cit”

¹¹ Tomaszewski K., Sekściński A. Odnawialne źródła energii w Polsce–perspektywa lokalna i regionalna. Rynek energii 4.149, 10-19, 2020.

¹² Główny Urząd Statystyczny, 2026, Polska na drodze zrównoważonego rozwoju, Raport SDG 2025. Pozyskano z <https://raportsdg.stat.gov.pl/cel7.html>

¹³ Główny Urząd Statystyczny, 2022. Środowisko. Energia. Energia 2022. Pozyskano z <https://stat.gov.pl/obszary-tematyczne/srodowisko-energia>.

¹⁴ Główny Urząd Statystyczny, 2025, Energia ze źródeł odnawialnych w 2024r. Warszawa, Rzeszów. Pozyskano z <https://stat.gov.pl/obszary-tematyczne/srodowisko-energia/energia/energia-ze-zrodel-odnawialnych-w-2024-r-3,19.html>

nia¹⁵. Struktura produkcji energii z OZE odzwierciedla te ograniczenia i możliwości. W 2024 r. dominującym źródłem energii odnawialnej pozostawały biopaliwa stałe, odpowiadające za 56,4% całkowitej produkcji. Istotny udział miała również energetyka wiatrowa (14,7%) oraz energia słoneczna (11,1%). W latach 2020–2024 krajowe zużycie energii ogółem ze źródeł odnawialnych zwiększyło się o 14,1%, natomiast końcowe zużycie energii brutto z OZE wzrosło o 9,4%. W 2024 r. wskaźnik udziału energii pochodzącej z odnawialnych źródeł w końcowym zużyciu energii brutto wyniósł 17,7%. Natomiast w podziale na sektory udział OZE osiągnął 30,4% dla elektroenergetyki, 21,2% w ciepłownictwie i chłodnictwie oraz 6,0% w transporcie¹⁶. Po 2020 roku polski sektor energetyczny odnotował bardzo dynamiczny wzrost mocy zainstalowanej w odnawialnych źródłach energii, co istotnie zmieniło strukturę krajowego systemu elektroenergetycznego. Skala zmian, jakie zaszły w latach 2020–2025, wskazuje na rosnące znaczenie tzw. zielonej energii. Zgodnie z danymi Agencji Rynku Energii, w 2020 roku instalacje OZE odpowiadały za 24,12% mocy zainstalowanej, osiągając poziom 12 490 MW. Do 2025 roku nastąpił ponad trzykrotny wzrost tej wartości – łączna moc zainstalowana w OZE wzrosła do 37 777 MW. Tak znacząca dynamika rozwoju przełożyła się na fundamentalną zmianę struktury mocy wytwórczych^{17,18}. W efekcie, na koniec 2025 roku odnawialne źródła energii stanowiły już 50,04% całkowitej mocy zainstalowanej w Polsce, co oznacza, że po raz pierwszy osiągnęły poziom połowy krajowego potencjału wytwórczego¹⁹.

Jednocześnie ze wzrostem mocy zainstalowanej wyraźnie zwiększa się także sama produkcja energii z OZE. W 2020 roku OZE wytworzyły 28 173 GWh energii elektrycznej, natomiast w 2025 roku wartość ta wzrosła do 54 743 GWh, co oznacza niemal dwukrotny wzrost w analizowanym okresie. Tak duży wzrost przełożył się również na zmianę struktury całej krajowej produkcji energii²⁰. W 2024 r. udział energii ze źródeł odnawialnych w końcowym zużyciu energii brutto wyniósł 17,7%, co oznacza wzrost o 1,0 pkt proc. w porównaniu z rokiem 2023 oraz o 2,1 pkt proc. względem 2021 r. Jeszcze wyraźniejsze zmiany odnotowano w sektorze elektroenergetycznym – udział energii elektrycznej z OZE w końcowym zużyciu energii brutto osiągnął poziom 30,4%, rosnąc o 4,6 pkt proc. rok do roku. Wzrost ten był przede wszystkim konsekwencją istotnego zwiększenia końcowego zużycia odnawialnej energii elektrycznej brutto (o 20,2%), przy jednoczesnym umiarkowanym wzroście całkowitego zużycia energii

¹⁵ Manowska A. Odnawialne źródła energii w krajowym miksie energetycznym. Zeszyty Naukowe Instytutu Gospodarki Surowcami Mineralnymi i Energią PAN: 111-122., 2019

¹⁶ Główny Urząd Statystyczny, 2025, Energia 2025, Rzeszów, Pozyskano z <https://stat.gov.pl/obszary-tematyczne/srodowisko-energia/energia/energia-ze-zrodel-odnawialnych-w-2024-r-3,19.html>

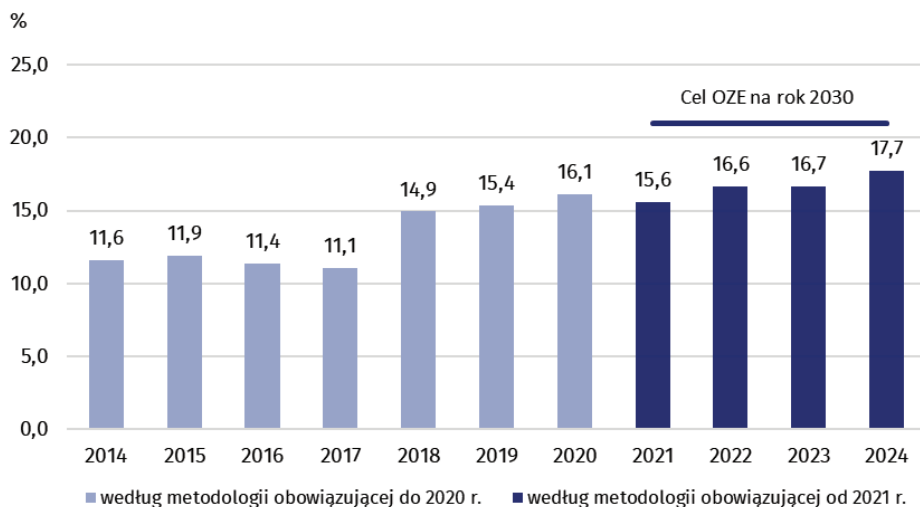
¹⁷ gov.pl Serwis Rzeczypospolitej Polskiej, Ministerstwo Klimatu i Środowiska. Polska osiąga 50% mocy z OZE - historyczny przełom! Pozyskano z <https://www.gov.pl/web/klimat/polska-osiaga-50-mocy-z-oze--historyczny-przelom>

¹⁸ Raport Transformacji 4.0, 2026. Pozyskano z <https://www.polskikongresklimatyczny.pl/raport>

¹⁹ gov.pl Serwis Rzeczypospolitej Polskiej, Ministerstwo Klimatu i Środowiska. Polska...”op.cyt”

²⁰ „Ibidem”

elektrycznej brutto (o 2,1%)²¹. Udział zielonej energii w elektroenergetyce w 2025 roku osiągnął poziom 31,41%. To oznacza, że w 2025 roku niemal co trzecia kilowatogodzina wyprodukowana w Polsce pochodziła z OZE²².



Rysunek 1. Procentowy udział energii ze źródeł odnawialnych w końcowym zużyciu energii brutto w latach 2014-2024

Źródło danych GUS²³

W ostatnich latach w Polsce szczególnie dynamicznie rozwijały się technologie związane z energetyką słoneczną oraz – chociaż w mniejszym stopniu – wodną. W latach 2020–2024 nastąpił wyraźny wzrost znaczenia energii słonecznej, która stała się najszybciej rozwijającym się segmentem odnawialnych źródeł energii w kraju²⁴. Istotną rolę w tym procesie odgrywa rozwój mikroinstalacji fotowoltaicznych, wykorzystywanych przede wszystkim przez gospodarstwa domowe oraz małe przedsiębiorstwa. Zgodnie z danymi Urzędu Regulacji Energetyki, na koniec 2024 roku liczba tego typu instalacji przekroczyła 1,5 mln, podczas gdy w 2018 roku było ich jedynie około 51 tys. Pomimo rosnącego udziału większych instalacji przemysłowych, mikroinstalacje prosumentek nadal stanowią ponad 70% wszystkich systemów fotowoltaicznych w Polsce²⁵. W 2024 r. łączne zużycie tej formy energii było blisko 6,5-krotnie wyższe

²¹ Główny Urząd Statystyczny, 2025, Energia ze źródeł odnawialnych w 2024r....”op.cit”.

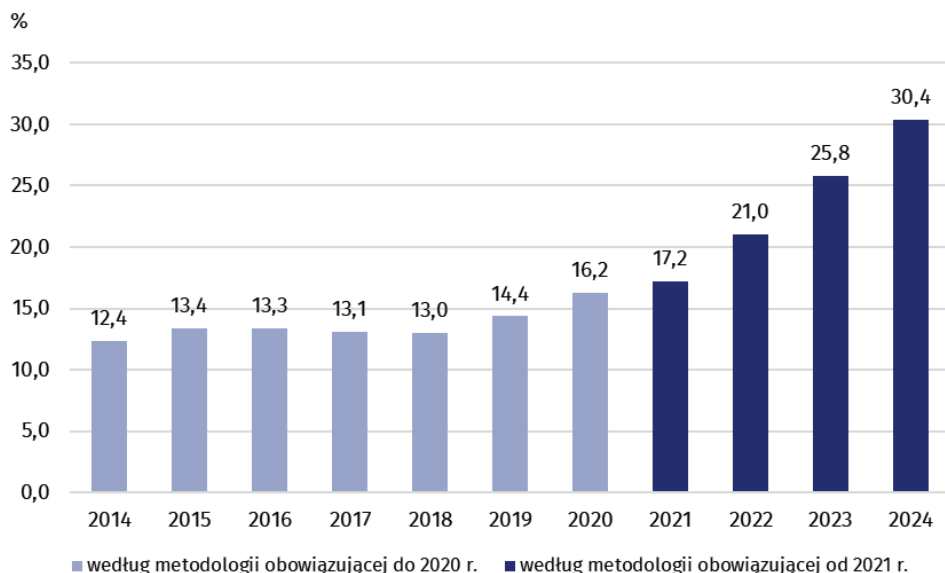
²² gov.pl Serwis Rzeczypospolitej Polskiej, Ministerstwo Klimatu i Środowiska. Polska....”op.cyt”

²³ Główny Urząd Statystyczny, 2025, Energia ze źródeł odnawialnych w 2024r....”op.cit”.

²⁴ TOrA M., KArboWnIcZeK M., Tora B. Fotowoltaika w Polsce: stan aktualny i perspektywy, Zeszyty Naukowe Instytutu Gospodarki Surowcami Mineralnymi i Energią, PAN 110: 111-118, 2022.

²⁵ Główny Urząd Statystyczny, 2026, Polska na drodze zrównoważonego rozwoju....”op.cit”.

w porównaniu z 2020 r. W przypadku kolektorów słonecznych zużycie energii było wyższe o 17,2%, a w przypadku ogniw fotowoltaicznych blisko 9 razy wyższe. Równocześnie znacząco wzrosła moc zainstalowana oraz produkcja energii elektrycznej z instalacji fotowoltaicznych. W latach 2020–2024 moc osiągalna w elektrowniach słonecznych zwiększyła się z 3 955 MW do 21 225 MW, natomiast produkcja energii wzrosła z 1 957,9 GWh do 17 662,8 GWh. Moc osiągalna oraz produkcja energii elektrycznej w ogniwach fotowoltaicznych w 2024 r. w porównaniu z 2023 r. wzrosły odpowiednio z 16 428 do 21 225 MW i z 11 107,1 do 17 662,8 GWh²⁶.



Rysunek 2. Procentowy udział energii elektrycznej ze źródeł odnawialnych w końcowym zużyciu energii brutto w elektroenergetyce w latach 2014–2024

Źródło danych GUS²⁷

Polityka i prognozowany rozwój OZE według sektorów

Polska deklaruje osiągnięcie do 2030 r. 32,6% udziału OZE w końcowym zużyciu energii brutto, jako wkład w realizację nowego ogólnounijnego celu na 2030 r. Osiągnięcie tego poziomu będzie wymagało skoordynowanego rozwoju wszystkich sektorów wykorzystania energii – elektroenergetyki, ciepłownictwa i chłodnictwa oraz transportu. Prognozy wskazują, że w perspektywie długoterminowej udział OZE będzie systematycznie rosł i może osiągnąć poziom 58,4% w 2040 r. Najbardziej dynamiczne zmiany przewidywane są w sektorze elektroenergetycznym, gdzie udział odnawialnych źródeł energii może wzrosnąć do 56,1% w 2030 r. oraz 69,4% w 2040 r. W sekto-

²⁶ Główny Urząd Statystyczny, 2025, Energia ze źródeł odnawialnych w 2024r....”op.cit”.

²⁷ Główny Urząd Statystyczny, 2025, Energia ze źródeł odnawialnych w 2024r....”op.cit”.

rze ciepłownictwa i chłodnictwa transformacja będzie przebiegać wolniej – prognozowany udział OZE może wynieść odpowiednio 35,4% w 2030 r. i 62,6% w 2040 r. Z kolei w transporcie przewidywany jest wzrost udziału energii odnawialnej do 17,7% w 2030 r. oraz 46,1% w 2040 r., jednak sektor ten pozostaje największym wyzwaniem transformacyjnym. Jak wskazuje Ministerstwo Aktywów Państwowych, osiągnięcie celów w obszarze transportu będzie najtrudniejsze, głównie ze względu na ograniczoną skalę elektryfikacji, konieczność rozwoju infrastruktury oraz wysoką zależność od paliw kopalnych²⁸. Dyrektywa RED III i wcześniejsza dyrektywa RED II nie określają odrębnych, wiążących celów dotyczących udziału odnawialnych źródeł energii wyłącznie w sektorze elektroenergetycznym, koncentrując się raczej na ogólnym poziomie udziału OZE w końcowym zużyciu energii brutto w skali całej gospodarki. Jednocześnie w Polsce obserwuje się znacznie szybszy niż pierwotnie zakładano rozwój sektora elektroenergetycznego opartego na OZE. Dynamiczna ekspansja instalacji fotowoltaicznych oraz lądowej energetyki wiatrowej, w połączeniu z rosnącym wsparciem państwa – obejmującym zarówno mechanizmy pomocowe, jak i inwestycje w infrastrukturę przesyłową – przyczyniły się do istotnego wzrostu udziału OZE w produkcji energii elektrycznej. W rezultacie aktualne szacunki udziału odnawialnych źródeł energii w elektroenergetyce znacząco przewyższają prognozy zawarte w Krajowy Plan w dziedzinie Energii i Klimatu 2019²⁹. Prognozy wskazują, że Polska może osiągnąć ok. 56,1% udziału OZE w finalnym zużyciu energii w elektroenergetyce w 2030 r., a w 2040 r. – 69,4%.

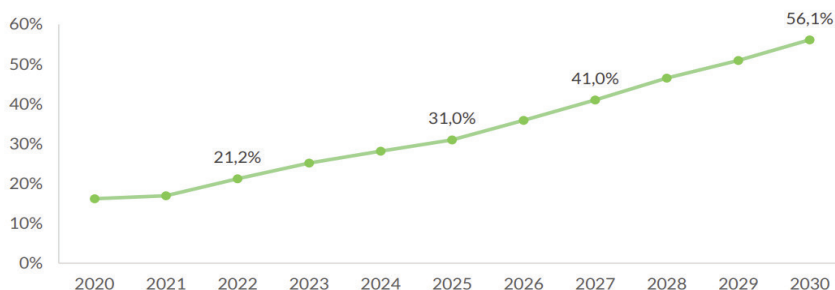
W perspektywie 2030 i 2040 r. największy przyrost produkcji energii elektrycznej ze źródeł odnawialnych w Polsce będzie generowany przede wszystkim przez energetykę słoneczną. Zakłada się, że moc zainstalowana elektrowni fotowoltaicznych osiągnie ok. 29 GW w 2030 r. oraz ok. 46,3 GW w 2040 r., co czyni ten segment kluczowym filarem dalszego rozwoju OZE. Drugim istotnym źródłem wzrostu będą elektrownie wiatrowe na lądzie, których moc ma wynieść ok. 19 GW w 2030 r. oraz ok. 25,8 GW w 2040 r. Znaczący udział w transformacji energetycznej będą również miały morskie farmy wiatrowe, rozwijane od ok. 2026 r., z prognozowaną mocą ok. 5,9 GW w 2030 r. oraz 17,9 GW w 2040 r. W dalszej kolejności wzrost produkcji energii zapewnią źródła oparte na biomasie, biogazie i biometanie, a także hydroenergetyka. Jednocześnie Krajowy Plan w dziedzinie Energii i Klimatu 2019 uwzględnia konieczność wymiany obecnie wykorzystywanych instalacji OZE, zakładając, że ich miejsce zajmą nowoczesne, bardziej efektywne technologicznie systemy wytwórcze³⁰.

²⁸ Obwieszczenie Ministra Klimatu i Środowiska z dnia 2 marca 2021 r. w sprawie polityki energetycznej państwa do 2040 r., Monitor Polski 2021, poz. 264. Pozyskano z: <https://www.dziennikustaw.gov.pl/M2021000026401.pdf>

²⁹ Ministerstwo Aktywów Państwowych. Krajowy Plan na Rzecz Energii i Klimatu na lata 2021-2030. Założenia i cele oraz polityki i działania. Ministerstwo Aktywów Państwowych, Wesja 4.1 z dn. 18.12.2019

³⁰ Krajowy Plan w dziedzinie Energii i Klimatu do 2030 r.”op.cit”.

Udział OZE w zużyciu energii w elektroenergetyce do 2030 r.

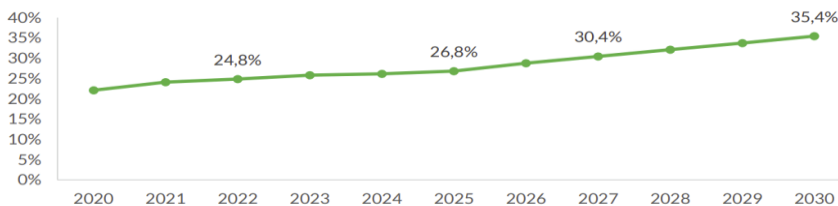


Rysunek 3. Procentowy udział energii ze źródeł odnawialnych w zużyciu energii w elektroenergetyce do 2030r.

Źródło danych GOV³¹

Dyrektywa RED III wprowadza jedynie częściową modyfikację podejścia do rozwoju odnawialnych źródeł energii w sektorze ciepłownictwa i chłodnictwa, określając tempo wzrostu ich udziału, a nie sztywny poziom docelowy dla poszczególnych państw członkowskich. Zgodnie z jej zapisami, państwa UE zobowiązane są do zwiększania udziału OZE w tym sektorze o co najmniej 0,8 pkt proc. średniorocznie w latach 2021–2025 oraz o 1,1 pkt proc. średniorocznie w latach 2026–2030. W przypadku Polski, gdzie w 2020 r. udział OZE w ciepłownictwie i chłodnictwie wynosił 22,1%, oznacza to orientacyjne poziomy na poziomie ok. 26,1% w 2025 r. oraz 31,6% w 2030 r.

Udział OZE w zużyciu energii w ciepłownictwie i chłodnictwie do 2030 r.



Rysunek 4. Procentowy udział energii ze źródeł odnawialnych w zużyciu energii w ciepłownictwie i chłodnictwie do 2030r.

Źródło danych GOV³²

Analizy wskazują, że Polska może przekroczyć te wartości, co wynika z przyspieszenia inwestycji w odnawialne źródła energii oraz modernizacji systemów ciepłowni-

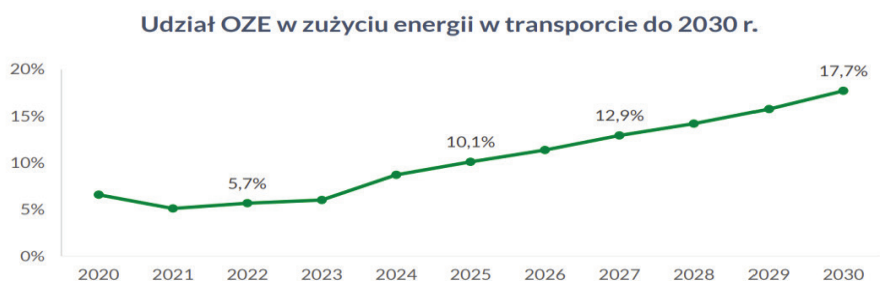
³¹ „Ibidem”

³² „Ibidem”

czych. Jednocześnie krajowe cele strategiczne zakładają bardziej ambitny poziom – 35,4% udziału OZE w ciepłownictwie i chłodnictwie w 2030 r., a w perspektywie długoterminowej nawet 62,6% w 2040 r.³³

Dyrektywa RED III wskazuje także na konieczność wyznaczania orientacyjnych celów dotyczących udziału odnawialnych źródeł energii w zużyciu energii końcowej w budynkach w perspektywie 2030 r. W Unii Europejskiej przyjęto wartość referencyjną na poziomie 49%. Polska określiła swój cel na poziomie 45% udziału OZE w zużyciu energii w budynkach do 2030 r. Prognozy długoterminowe wskazują jednak na dalszą intensyfikację transformacji energetycznej w tym sektorze, gdzie w 2040 r. udział ten może osiągnąć nawet 72,5%. Struktura wykorzystania odnawialnych źródeł energii w budynkach będzie ulegała istotnym zmianom. Tradycyjnie dominująca biomasa będzie stopniowo tracić na znaczeniu, podczas gdy rosnąć będzie udział energii pochodzącej z pomp ciepła, energii elektrycznej z sieci (coraz częściej opartej na OZE) oraz energii słonecznej. Zwiększy się również znaczenie odnawialnej energii dostarczanej z systemów ciepłowniczych, co będzie efektem postępującego „zazieleniania” infrastruktury ciepłowniczej i modernizacji systemów dystrybucji energii³⁴.

RED III nakłada na państwa członkowskie Unii Europejskiej obowiązek osiągnięcia 29% udziału odnawialnych źródeł energii w końcowym zużyciu energii w transporcie lub alternatywnie redukcji intensywności emisji gazów cieplarnianych w tym sektorze o 14,5%. Prognozy dla Polski wskazują jednak, że do 2030 r. udział OZE w transporcie może wynieść jedynie około 17,7%, co oznacza istotną lukę względem wyznaczonego poziomu unijnego. W konsekwencji realizacja celu 29% jest oceniana jako mało prawdopodobna w obecnych uwarunkowaniach technologicznych i infrastrukturalnych. W latach 2018–2021 udział OZE w sektorze transportu utrzymywał się na relatywnie niskim poziomie, oscylując wokół 6%, co wskazuje na powolne tempo zmian w tym obszarze.



Rysunek 3. Procentowy udział energii ze źródeł odnawialnych w zużyciu energii w transporcie do 2030r.

Źródło danych GOV³⁵

³³ „Ibidem”

³⁴ „Ibidem”

³⁵ „Ibidem”

Jednocześnie rosnąca aktywność gospodarcza w transporcie dodatkowo utrudnia szybkie zwiększenie udziału energii odnawialnej. Ograniczenia te wynikają przede wszystkim z niewystarczającego tempa rozwoju elektromobilności oraz technologii wodorowych, które napotykać bariery związane z dostępnością rynkową, opłacalnością ekonomiczną oraz niedostatecznie rozwiniętą infrastrukturą ładowania i dystrybucji paliw alternatywnych. W efekcie sektor transportu pozostaje jednym z największych wyzwań w procesie transformacji energetycznej w Polsce³⁶.

Prognozy rozwoju transformacji polskiego sektora odnawialnych źródeł energii

Polski system energetyczny, pomimo widocznego postępu w rozwoju odnawialnych źródeł energii, nadal pozostaje silnie uzależniony od paliw kopalnych, które odpowiadają za około 85% zużycia energii pierwotnej. Wskazuje to na konieczność dalszej, intensywnej transformacji sektora energetycznego. Rozwój OZE w Polsce ma charakter nierównomierny i niespójny między poszczególnymi technologiami. W 2024 roku odnawialne źródła energii odpowiadały za 30,4% produkcji energii elektrycznej. Największy udział w przyroście nowych mocy zainstalowanych miała fotowoltaika, co wynikało głównie z dynamicznego rozwoju prosumenckich instalacji oraz budowy większych elektrowni PV³⁷. Zgodnie ze scenariuszem rynkowym, w latach 2023–2040 moc zainstalowana fotowoltaiki wzrośnie z 16 GW do 61 GW, a produkcja energii zwiększy się z 11 TWh do 59 TWh rocznie^{38,39}.

Znacznie wolniejszy rozwój obserwuje się w przypadku energetyki wiatrowej na lądzie⁴⁰. Inwestycje w tym sektorze realizowane są głównie przez prywatnych inwestorów i koncentrują się w północno-zachodniej Polsce. Energia wiatrowa jest jednym z najczystszych źródeł energii, ponieważ jej produkcja nie wiąże się z emisją zanieczyszczeń do atmosfery. Mimo to rozwój tej technologii ograniczają liczne bariery, w tym wysokie koszty początkowe, uwarunkowania środowiskowe, restrykcyjne regulacje prawne oraz trudności w uzyskiwaniu warunków przyłączenia do sieci⁴¹. Szacuje się jednak, że do 2040 roku moc lądowych farm wiatrowych wzrośnie z 9 GW do 33 GW, a produkcja energii zwiększy się z 24 TWh do 87 TWh rocznie. Energetyka wodna, mimo ograniczonych zasobów hydrologicznych Polski, stanowi uzupełniający element krajowego miks energetycznego. Teoretyczny potencjał hydroenergetyczny polskich rzek szacowany jest na około 23 TWh rocznie, natomiast potencjał techniczny

³⁶ „Ibidem”

³⁷ Kwidziński K., Dusiło M. Transformacja energetyczna w Polsce....”op.cit”

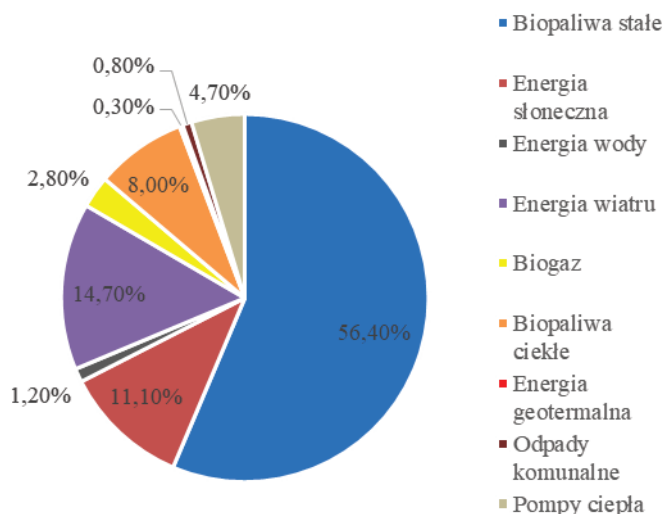
³⁸ McKinsey & Company. Polska Energetyka 2050, Czas odważnych decyzji. Pozyskano z https://www.mckinsey.com/pl/~media/mckinsey/locations/europe%20and%20middle%20east/polska/raporty/polska%20energetyka%202050/20250423_polska%20energetyka%202050_%20final.pdf

³⁹ Solar Energy Expo, 2026, Raport Branżowy OZE Polska, Europa, Świat, Odnawialne Źródła Energii Podsumowanie Rynku 2025. Pozyskano z https://solarenergyexpo.com/wp-content/uploads/2026/01/Raport-branzowy-OZE-2025-%E2%80%93-Polska-Europa-Swiat_compressed.pdf

⁴⁰ Kwidziński K., Dusiło M. Transformacja energetyczna w Polsce....”op.cit”

⁴¹ Seroka A. Odnawialne Źródła Energii Jako Element Zarządzania Bezpieczeństwem Energetycznym Państwa, Zeszyty Naukowe Politechniki Częstochowskiej Zarządzanie, 46 (1):. 88-100, DOI: 10.17512/znpcz.2022.2.07, 2022, Pozyskano z <http://www.zim.pcz.pl/znwz>

wynosi około 13,7 TWh⁴². Elektrownie wodne zwiększyły swoją moc z 3 960 MW do aż 24 808 MW, a elektrownie wiatrowe z 6 402 MW do 10 550 MW⁴³. Zgodnie z założeniami polityki energetycznej, moc elektrowni wodnych ma osiągnąć około 1,0 GW w 2030 roku oraz 1,2 GW w 2040 roku, co pozwoli na produkcję około 3 TWh energii rocznie. Dodatkową korzyścią rozwoju małych elektrowni wodnych jest ich funkcja retencyjna, wspierająca przeciwdziałanie skutkom suszy i powodzi⁴⁴.



Rysunek 6. Bilans energii ze źródeł odnawialnych wg. nośników w 2024r.

Źródło danych GUS⁴⁵.

Istotną rolę w przyszłym miksie energetycznym Polski ma odegrać również morska energetyka wiatrowa. Zgodnie z założeniami Polityki Energetycznej Polski do 2040 roku, moc zainstalowana w morskich farmach wiatrowych osiągnie 5,9 GW w 2030 roku oraz do 11 GW w 2040 roku⁴⁶. Morska energetyka wiatrowa stanowi strategiczny kierunek transformacji energetycznej, wzmacniający bezpieczeństwo energetyczne oraz będący istotnym impulsem dla rozwoju gospodarczego Polski. Zgodnie z prognozami, morskie farmy wiatrowe (offshore) będą odpowiadać za około 13% produkcji energii elektrycznej w 2030 roku oraz 19% w 2040 roku. Pierwsze instalacje zlokalizowane

⁴² McKinsey & Company, Polska Energetyka 2050...”op.cit”

⁴³ Główny Urząd Statystyczny, 2025, Energia ze źródeł odnawialnych w 2024r...”op.cit”.

⁴⁴ Raport Transformacji 4.0, 2026.”op.cit”.

⁴⁵ Główny Urząd Statystyczny. Energia ze źródeł odnawialnych 2024. Pozyskano z: https://stat.gov.pl/download/gfx/portalinformacyjny/pl/defaultaktualnosci/5485/3/19/1/energia_ze_zrodel_odnawialnych_2024.zip

⁴⁶ gov.pl Serwis Rzeczypospolitej Polskiej, Morska Energetyka Wiatrowa.”op.cit”.

w polskiej wyłącznej strefie ekonomicznej Morza Bałtyckiego rozpoczną produkcję energii już w 2026 roku⁴⁷.

Szacuje się, że transformacja polskiego sektora elektroenergetycznego będzie wymagać inwestycji na niespotykaną dotąd skalę – około 275 mld zł w ciągu pięciu lat oraz ponad 550 mld zł w perspektywie najbliższej dekady. Planowane do 2030 roku nakłady obejmują m.in. budowę nowych instalacji odnawialnych źródeł energii (ok. 90 mld zł), rozbudowę i modernizację sieci dystrybucyjnych (ok. 85 mld zł) oraz przesyłowych (ok. 65 mld zł), a także rozwój nowych elektrowni gazowych (ok. 25 mld zł). Szacuje się, że średnioroczne inwestycje w sektor OZE wyniosą około 55 mld zł. W dłuższej perspektywie, do 2050 roku, łączna wartość inwestycji może osiągnąć poziom około 1,9 bln zł⁴⁸. Szacowana wartość inwestycji w morską energetykę wiatrową wyniesie około 130 mld zł. Nakłady te umożliwią rozwój krajowego łańcucha dostaw oraz przyczynią się do powstania nowych, wysokopłatnych miejsc pracy. Głównymi beneficjentami będą m.in. stocznie oraz przedsiębiorstwa z sektora przemysłu stalowego i metalowego⁴⁹.

Ograniczenia rozwoju transformacji polskiego sektora odnawialnych źródeł energii

Pomimo dynamicznego wzrostu udziału odnawialnych źródeł energii w polskim miksie energetycznym, proces transformacji napotyka szereg istotnych barier o charakterze systemowym, regulacyjnym, technicznym oraz społecznym.

Jednym z najpoważniejszych problemów jest niedostatecznie rozwinięta infrastruktura elektroenergetyczna. Infrastruktura przesyłowa i dystrybucyjna w wielu regionach kraju jest przestarzała i niewystarczająco rozwinięta, co skutkuje ograniczeniami w przyłączaniu nowych instalacji OZE, w szczególności farm wiatrowych i fotowoltaicznych. Problem ten pogłębia rosnąca liczba odmów wydawania warunków przyłączenia do sieci, co znacząco spowalnia tempo inwestycji. Zgodnie z danymi Urzędu Regulacji Energetyki, w latach 2015–2021 operatorzy wydali ponad 6 tys. odmów przyłączenia instalacji, głównie OZE, o łącznej mocy około 30 GW, z czego tylko w 2021 r. było to aż 3751 odmów o mocy 15 GW. Skala ta pokazuje, że sieci stanowią jedno z głównych „wąskich gardeł” transformacji energetycznej w Polsce^{50,51}.

Ważnym aspektem jest również brak wystarczających mocy magazynowania energii oraz elastyczności systemu elektroenergetycznego. Niestabilny charakter produkcji energii z OZE, uzależniony od warunków pogodowych, wymaga rozwoju technologii

⁴⁷ „Ibidem”

⁴⁸ McKinsey & Company, Polska Energetyka 2050.... ”op.cit”

⁴⁹ gov.pl Serwis Rzeczypospolitej Polskiej, Morska Energetyka Wiatrowa.”op.cit”.

⁵⁰ Modzelewski W. ClientEarth, Sieci – wąskie gardło polskiej transformacji energetycznej, 2022.

⁵¹ Urząd Regulacji Energetyki, Roczne sprawozdania z działalności Prezesa Urzędu Regulacji Energetyki za lata 2015- 2021, Pozyskano z <https://www.ure.gov.pl/pl/urzadz/informacje-ogolne/edukacja-i-komunikacja/publikacje/sprawozdania-z-dzialaln/2916,Sprawozdania-zdzialalnosci-Prezesa-URE.html>.

magazynowania oraz źródeł bilansujących, co wciąż stanowi wyzwanie technologiczne i ekonomiczne. Pomimo, że energia ze źródeł odnawialnych zastępuje na rynku energetycznym nieelastyczne moce węglowe, z powodu braku magazynów energii i elastycznego popytu odnotowuje się coraz częstsze przypadki ograniczania pracy OZE. W 2025 roku miało miejsce rekordowe ograniczanie generacji źródeł OZE (nierynkowego redysponowania tzw. curtailmentu), do sieci nie trafiło dwukrotnie więcej energii niż w roku 2024 – blisko 1,4 TWh, z czego 97,8% energii utraconej, wynikało z przyczyn bilansowych, za pozostałą część odpowiadały kwestie sieciowe⁵².

Istotną barierą są również uwarunkowania prawne i administracyjne. Złożone i czasochłonne procedury uzyskiwania pozwoleń, częste zmiany regulacyjne oraz brak stabilności polityki energetycznej ograniczają skłonność inwestorów do podejmowania długoterminowych projektów. Przykładem może być rozwój energetyki wiatrowej na lądzie, który przez lata był hamowany przez restrykcyjne przepisy lokalizacyjne⁵³.

Kolejnym wyzwaniem są wysokie koszty inwestycyjne, szczególnie w przypadku dużych projektów infrastrukturalnych, takich jak morskie farmy wiatrowe czy modernizacja sieci. Pomimo rosnącej dostępności finansowania, skala wymaganych nakładów stanowi istotne obciążenie zarówno dla sektora publicznego, jak i prywatnego⁵⁴.

Nie bez znaczenia pozostają także ograniczenia środowiskowe i społeczne. Inwestycje w OZE często spotykają się z oporem lokalnych społeczności, co wynika m.in. z obaw dotyczących wpływu na krajobraz, hałas czy środowisko naturalne. Dodatkowo konieczność ochrony obszarów przyrodniczych ogranicza dostępność terenów pod nowe instalacje⁵⁵.

Ryzyko niezbilansowanego systemu jest coraz bardziej widoczne, szczególnie przy rekordowym zapotrzebowaniu na energię w szczycie. Dlatego kluczowym aspektem dla dalszej transformacji jest nie tylko rozbudowa mocy odnawialnych, ale przede wszystkim modernizacja sieci infrastruktury, rozwój i wzrost znaczenia magazynów energii oraz wsparcie dla elastyczności po stronie odbiorców. Ponadto brak spójnych ram strategicznych oraz niespójność instytucjonalna stanowią istotną barierę rozwoju sektora OZE w Polsce. Stabilne regulacje są niezbędnym warunkiem koniecznym do dalszego niezachwianego rozwoju energetyki wiatrowej na lądzie, przyspieszenia inwestycji offshore oraz rozwoju magazynów energii⁵⁶.

⁵² Forum Energii (on-line) Pozyskano z https://www.forum-energii.eu/2025_wrapped "op.cit".

⁵³ Niedziela J. Lokalizacja instalacji odnawialnych źródeł energii—aspekty prawne. *Studia Iuridica* 86: 196-211, 2020

⁵⁴ McKinsey & Company. *Polska Energetyka 2050....*"op.cit"

⁵⁵ Smolinski, P. R., Januszewicz, J., Pawłowska, B., Winiarski, J. Nuclear energy acceptance in Poland: From societal attitudes to effective policy strategies—Network modeling approach. *Plos one*, 19(8), e0305115, 2024

⁵⁶ Kwidziński K., Dusilo M. Transformacja energetyczna w Polsce...."op.cit"

Podsumowanie

Transformacja sektora odnawialnych źródeł energii w Polsce znajduje się obecnie w fazie przejścia od wzrostu ilościowego do jakościowego. Tempo zmian w miksie energetycznym w Polsce jest wyjątkowo szybkie – jeszcze w 2015 roku około 80% energii w pozyskiwano z węgla, a dekadę później jego udział wynosi 52,5%. Rozwój odnawialnych źródeł energii w Polsce przebiega najszybciej w historii, jednak jego tempo nadal może okazać się niewystarczające wobec prognozowanego wzrostu krajowego zapotrzebowania na energię elektryczną.

Zgodnie z prognozami, popyt na energię może wzrosnąć do poziomu 345–471 TWh w 2050 roku, co będzie istotnym czynnikiem stymulującym rozwój nowych mocy wytwórczych, w tym OZE. W perspektywie do 2030 roku przewiduje się znaczącą rozbudowę krajowego potencjału wytwórczego. Obejmie ona zarówno rozwój nowych wysokoprężnych bloków gazowych (ok. +7 GW względem 2023 r.), jak i dalszą ekspansję sektora odnawialnych źródeł energii. W szczególności zakłada się przyrost mocy w fotowoltaice (ok. +10 GW) oraz w energetyce wiatrowej – zarówno lądowej (+6 GW), jak i morskiej (+5 GW). W kolejnej dekadzie istotnym zmianom ulegnie także struktura krajowego miksu energetycznego. Szacuje się, że około 2035 roku udział OZE w produkcji energii elektrycznej może osiągnąć poziom zbliżony do obecnego udziału źródeł konwencjonalnych, tj. około 70%. Oznacza to stopniowe przechodzenie od systemu opartego na paliwach kopalnych do modelu niskoemisyjnego. W krótkim okresie Polska prawdopodobnie zwiększy import energii elektrycznej z krajów sąsiednich, zwłaszcza w godzinach wysokiej generacji OZE w tych państwach. Jednak wraz z rozwojem morskiej energetyki wiatrowej oraz planowanym uruchomieniem pierwszej elektrowni jądrowej, krajowy system elektroenergetyczny może osiągnąć zdolność do eksportu netto energii elektrycznej. Trend ten będzie szczególnie widoczny po 2030 roku i może się nasilić w kolejnych dekadach⁵⁷.

Tempo i efektywność transformacji energetycznej będą w dużej mierze uzależnione od stabilności regulacji prawnych, rozwoju infrastruktury sieciowej, wdrażania technologii magazynowania energii oraz poziomu integracji sektora energetycznego z innymi obszarami gospodarki. Kluczowe znaczenie dla dalszego rozwoju odnawialnych źródeł energii ma postęp technologiczny, w szczególności w obszarze magazynowania energii, które stanowi „brakujące ogniwo” systemu elektroenergetycznego. Istotną rolę odgrywać będzie również cyfryzacja systemów energetycznych, w tym rozwój inteligentnych sieci (*smart grids*), umożliwiających bardziej efektywne zarządzanie produkcją i konsumpcją energii. Ponadto coraz większego znaczenia nabiera integracja OZE z technologiami wodorowymi, które mogą pełnić funkcję nośnika energii oraz narzędzia stabilizującego system w warunkach rosnącego udziału źródeł niestabilnych.

⁵⁷ McKinsey & Company. Polska Energetyka 2050....”op.cit”

Bibliografia

- Dyrektywa Parlamentu Europejskiego I Rady (UE) 2023/2413 z dnia 18 października 2023 r. zmieniająca dyrektywę (UE) 2018/2001, rozporządzenie (UE) 2018/1999 i dyrektywę 98/70/WE w odniesieniu do promowania energii ze źródeł odnawialnych oraz uchylająca dyrektywę Rady (UE) 2015/652
- EUROPEAN COMMISSION EUROSTAT Directorate E: Sectoral and regional statistics Unit E.5: Energy. SHARES Tool Manual Version 2024.120925 Pozyskano z [https://ec.europa.eu/eurostat/web/energy/database/additional-data#Short%20assessment%20of%20renewable%20energy%20sources%20\(SHARES\)](https://ec.europa.eu/eurostat/web/energy/database/additional-data#Short%20assessment%20of%20renewable%20energy%20sources%20(SHARES))
- Forum Energii (on-line) Pozyskano z https://www.forum-energii.eu/2025_wrapped
- Główny Urząd Statystyczny. Energia ze źródeł odnawialnych 2024. Pozyskano z https://stat.gov.pl/download/gfx/portalinformacyjny/pl/defaultaktualnosci/5485/3/19/1/energia_ze_zrodel_odnawialnych_2024.zip
- Główny Urząd Statystyczny, 2025, Energia 2025, Rzeszów, Pozyskano z <https://stat.gov.pl/obszary-tematyczne/srodowisko-energia/energia/energia-ze-zrodel-odnawialnych-w-2024-r-,3,19.html>
- Główny Urząd Statystyczny, 2025, Energia ze źródeł odnawialnych w 2024r. Warszawa, Rzeszów. Pozyskano z <https://stat.gov.pl/obszary-tematyczne/srodowisko-energia/energia/energia-ze-zrodel-odnawialnych-w-2024-r-,3,19.html>
- Główny Urząd Statystyczny, 2026, Polska na drodze zrównoważonego rozwoju, Raport SDG 2025. Pozyskano z <https://raportsdg.stat.gov.pl/cel7.html>
- Główny Urząd Statystyczny, 2022. Środowisko. Energia. Energia 2022. Pozyskano z: <https://stat.gov.pl/obszary-tematyczne/srodowisko-energia>.
- gov.pl Serwis Rzeczypospolitej Polskiej, Ministerstwo Klimatu i Środowiska. Polska osiąga 50% mocy z OZE - historyczny przełom! Pozyskano z <https://www.gov.pl/web/klimat/polska-osiaga-50-mocy-z-oze--historyczny-przelom>
- gov.pl Serwis Rzeczypospolitej Polskiej, Morska Energetyka Wiatrowa. Program Rozwoju MFW w Polsce. Program Rozwoju Morskich Farm Wiatrowych. Pozyskano z <https://www.gov.pl/web/morska-energetyka-wiatrowa/program-rozwoju-morskich-farm-wiatrowych#:~:text=morskie%20farmy%20wiatrowe%20b%C4%99d%C4%85%20odpowiada%C4%87,energi%C4%99%20ju%C5%BC%20w%202026%20roku>
- IRENA, 2025, Renewable capacity statistics 2025, International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi
- Krajowy Plan w dziedzinie Energii i Klimatu do 2030 r. (aktualizacja KPEiK z 2019 r.) Warszawa, 2024.
- Kwidziński K., Dusiło M. Transformacja energetyczna w Polsce, Edycja 2025, Forum Energii, 2025. Pozyskano z <https://www.forum-energii.eu/transformacja-energetyczna-polski-edycja-2025>
- Manowska A. Odnawialne źródła energii w krajowym miksie energetycznym. Zeszyty Naukowe Instytutu Gospodarki Surowcami Mineralnymi i Energią PAN : 111-122, 2019.
- McKinsey & Company, Polska Energetyka 2050, Czas odważnych decyzji. Pozyskano z: https://www.mckinsey.com/pl/~media/mckinsey/locations/europe%20and%20middle%20east/polska/raporty/polska%20energetyka%202050/20250423_polska%20energetyka%202050_%20final.pdf
- Miesięczniki Forum Energii (on-line): Pozyskano z <https://www.forum-energii.eu/miesiecznik>
- Ministerstwo Aktywów Państwowych. Krajowy Plan na Rzecz Energii i Klimatu na lata 2021-2030. Założenia i cele oraz polityki i działania. Ministerstwo Aktywów Państwowych, Wesja 4.1 z dn. 18.12.2019

- Modzelewski W. ClientEarth, Sieci – wąskie gardło polskiej transformacji energetycznej, 2022.
- Niedziela J. "Lokalizacja instalacji odnawialnych źródeł energii–aspekty prawne." *Studia Iuridica* 86: 196-211, 2020.
- Obwieszczenie Ministra Klimatu i Środowiska z dnia 2 marca 2021 r. w sprawie polityki energetycznej państwa do 2040 r., *Monitor Polski* 2021, poz. 264. Pozyskano z <https://www.dziennikustaw.gov.pl/M2021000026401.pdf>
- Seroka, A. Odnawialne Źródła Energii Jako Element Zarządzania Bezpieczeństwem Energetycznym Państwa, *Zeszyty Naukowe Politechniki Częstochowskiej Zarządzanie*, 46 (1):. 88-100, DOI: 10.17512/znpcz.2022.2.07, 2022. Pozyskano z <http://www.zim.pcz.pl/znwz>
- Smolinski, P. R., Januszewicz, J., Pawłowska, B., Winiarski, J. Nuclear energy acceptance in Poland: From societal attitudes to effective policy strategies—Network modeling approach. *Plos one*, 19(8), e0305115, 2024.
- Solar Energy Expo, 2026, Raport Branżowy OZE Polska, Europa, Świat, Odnawialne Źródła Energii Podsumowanie Rynku 2025. Pozyskano z https://solarenergyexpo.com/wp-content/uploads/2026/01/Raport-branzowy-OZE-2025-%E2%80%93-Polska-Europa-Swiat_compressed.pdf
- Tomaszewski K., Sekściński A.: Odnawialne źródła energii w Polsce–perspektywa lokalna i regionalna. *Rynek energii* 4.149, 10-19, 2020.
- TOrA M., KArboWnIcZeK M., Tora B.: Fotowoltaika w Polsce: stan aktualny i perspektywy, *Zeszyty Naukowe Instytutu Gospodarki Surowcami Mineralnymi i Energią, PAN* 110,: 111-118, 2022.
- Urząd Regulacji Energetyki, Roczne sprawozdania z działalności Prezesa Urzędu Regulacji Energetyki za lata 2015- 2021, Pozyskano z <https://www.ure.gov.pl/pl/urzed/informacje-ogolne/edukacja-i-komunikacja/publikacje/sprawozdania-z-dzialaln/2916,Sprawozdania-zdzialalnosci-Prezesa-URE.html>.
- Raport Transformacji 4.0, 2026. Pozyskano z <https://www.polskikongresklimatyczny.pl/raport>

Adres do korespondencji: asaletnik@ur.edu.pl

ORCID: Czesław Puchalski 0000-0001-5916-2678

ORCID: Aneta Saletnik 0000-0002-1297-3120

ORCID: Bogdan Saletnik 0000-0002-6640-218X



ISBN 978-83-64377-93-8